

Всесоюзный научно-исследовательский институт
электромашиностроения
(ВНИИэлектромаш)

На правах рукописи

Яковлев Валерий Иванович

Электромагнитные поля и потери мощности в торцевых
зонах крупных турбо- и гидрогенераторов

Специальность 05.09.01 - Электрические машины

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ленинград - 1991

Работа выполнена во Всесоюзном научно-исследовательском институте электромашиностроения, г. Ленинград

Официальные оппоненты: академик АН УССР

Счастливый Геннадий Григорьевич,
доктор технических наук, профессор
Иванов-Смоленский Алексей Владимирович;
доктор технических наук, профессор
Чечурин Владимир Леонидович

Ведущая организация: НИИ ЛПЭО "Электросила" им. С.М. Кирова
Защита диссертации состоится "____" _____ 1991 г.,
в _____ час. _____ мин. на заседании специализированного
Совета Д 143.02.01 при Всесоюзном научно-исследовательском
институте электромашиностроения по адресу: г. Ленинград,
Московский пр. 100.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.
Отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учрежде-
ния, просим прислать по адресу: 192041, Д-41, Ленинград,
Дворцовая наб., 18.

Автореферат разослан "____" _____ 1991 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
канд. техн. наук

А. А. Каримов

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00815578 (Y)

Подписано в печать 18.06.91.
Зах. № 129. Тир. 150 экз. Рот. ВНИИэлектромаш.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН УРСР

Актуальность проблемы. Современный этап развития крупных турбо- и гидрогенераторов характеризуется повышением удельных электромагнитных нагрузок и внедрением ряда конструктивных решений для снижения потерь мощности в торцевой зоне статора. Созданы и находятся в эксплуатации новые типы двухполюсных турбогенераторов, в частности единой унифицированной серии (ТВВ) мощностью 63-800 МВт, с полным водяным охлаждением (ТЗВ) мощностью 800 МВт, с водомасляным охлаждением (ТВМ) мощностью 300 и 500 МВт, с продольно-поперечным возбуждением (АСТГ) мощностью 200 МВт. Впервые в нашей стране изготовлены гидрогенераторы с полным водяным охлаждением для Рогунский ГЭС мощностью 600 МВт, 166,7 об/мин. В последние годы единичная мощность двухполюсных турбогенераторов возросла до 1200 МВт, ужесточились требования к режимам недовозбуждения турбо- и гидрогенераторов, к их маневренности, возникла необходимость уточнения тепловых нагрузок в демпферной обмотке гидрогенераторов, имеющих полное водяное охлаждение, при нестационарных режимах. Конструктивные элементы торцевых зон турбо- и гидрогенераторов в различных эксплуатационных условиях могут нести повышенные удельные электромагнитные нагрузки, приводящие к значительным местным перегревам соответствующих узлов. Следствием этого является необходимость ограничения в эксплуатации активной и реактивной мощности машин и снижения соответственно выдаваемой потребителям электроэнергии.

Существенной проблемой, связанной с созданием и применением таких типов машин, становится проблема обеспечения и расширения пределов их нагрузочной способности и маневренности на уровне современных режимных требований эксплуатации.

В диссертации на базе исследования выделяемых потерь мощности и соответствующих физических процессов развиты теоретические методы для выбора и анализа конструкции торцевой зоны статора крупных турбо- и гидрогенераторов, сформулированы моделирующие задачи для описания возникающих проблем, найдены соответствующие решения с достаточной для практики точностью, выявлены и уточнены имеющие место основные физические закономерности, разработаны и внедрены конструктивные меры по повышению нагрузочной способности генераторов в режимах недовозбуждения.

Работа выполнялась по программам ГИИТ и АН СССР по решению научно-технических проблем: по созданию и освоению крупных автоматизированных энергоблоков для ТЭС (программа 0.01.01), по созданию оборудования для ГАЭС (программа 0.01.05), по созданию новых видов оборудования для производства электрической и тепловой энергии (программа 0.11.002), по развитию единой энергетической системы СССР (программа 0.11.003), по отраслевым планам Минэлектротехпрома СССР при исследованиях по созданию узлов новых типов турбогенераторов (темы Т0185010 и Т0184012) и гидрогенераторов (темы Т0286012 и Т0281003853).

Цель работы и задачи исследования. Целью работы является решение научной проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение и заключающейся в обеспечении и расширении пределов нагрузочной способности и маневренности крупных турбо- и гидрогенераторов на уровне современных режимных требований за счет снижения максимальных значений и неравномерности распределения электромагнитных потерь и местных нагревов в торцевой зоне статора путем разработки ее рациональной конструкции. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1) разработать научные принципы рационального выбора конструкции торцевой зоны статора турбо- и гидрогенераторов на ранней стадии проектирования и ускоренные методы соответствующих расчетов с учетом сложной геометрии активных и конструктивных окружающих ферромагнитных поверхностей, взаимного расположения нажимных устройств сердечника статора и токовых слоев лобовых частей обмоток;

2) разработать математическую модель для комплексного анализа электромагнитных процессов в торцевой зоне статора турбо- и гидрогенераторов с учетом тепловых и механических явлений в процессе эксплуатации;

3) исследовать электромагнитные, температурные поля и термомеханические явления в наиболее напряженных конструктивных элементах торцевой зоны статора новых типов турбо- и гидрогенераторов с полным водяным охлаждением при работе их в широком диапазоне изменения нагрузки, в том числе и в режимах недо возбуждения, установить причины возникновения в этих конструктивных элементах неустойчивого температурного поля в процессе эксплуатации и дать рекомендации по устранению этих причин. На основе исследования электромагнитных и тепловых процессов разработать и

и обосновать конструктивные мероприятия для снижения потерь в рассматриваемых зонах с учетом возможной неидеальной контактной теплопередачи между элементами торцевой зоны сердечника статора, а также оценить роль и значение применяемых электромагнитных экранов различной конструкции в процессе эксплуатации;

4) исследовать проблему обеспечения повышенной нагрузочной способности турбогенераторов с водородным охлаждением в режимах недовозбуждения. Выявить и изучить электромагнитные процессы, вызывающие распушевку и повреждения крайних пакетов сердечника статора, обобщить результаты исследования явлений, связанных с применением магнитного шунта в торцевой зоне статора турбогенераторов, и на их основе разработать рекомендации по защите крайних пакетов сердечника статора от магнитных полей рассеяния;

5) исследовать особенности электромагнитных процессов в торцевой зоне статора гидрогенераторов разной мощности и оценить эффективность предлагаемых и применяемых конструктивных мер, которые используются для снижения уровня и неравномерности распределения местных потерь в торцевой зоне.

Методы исследования. Теоретические исследования проблем выбора конструкций базировались на численно-аналитических методах решения дифференциальных уравнений в частных производных, в частности проекционным методе, дополненном алгеброй логики и R-функциями, декомпозиционным методе с конформным преобразованием канонических областей, методе разделения переменных по Г.А.Гринбергу. Применен метод скалярного магнитного и электрического векторного потенциалов, метод конечных разностей и элементов, метод численного решения систем алгебраических уравнений с разреженными матрицами. Результаты расчетно-теоретических исследований подтверждены соответствующими экспериментальными данными, полученными на стендах заводов, в условиях эксплуатации генераторов на станциях, а также на специально созданных макетах.

Научная новизна работы. К основным научным результатам, полученным впервые и защищаемым автором, относятся:

I. Развитие методов численно-аналитического расчета электромагнитного поля, возникающего в торцевых зонах турбо- и гидрогенераторов, с целью создания математических моделей для выбора рациональной геометрии, целесообразного взаимного расположения конструктивных элементов торцевой зоны турбо- и гидрогенераторов и выбора надлежащих используемых в практике электромашиностроения

электро-, теплотехнических свойств материалов.

2. Разработка на базе единого программного обеспечения метода конечных элементов и графических средств для ЭВМ математической модели с целью комплексного численного анализа электромагнитных процессов во взаимосвязи с возникающими тепловыми и термомеханическими явлениями в торцевой зоне статора турбо- и гидрогенераторов для детального исследования и обоснования соответствующих рациональных конструктивных решений при рабочем проектировании.

3. Развитие метода скалярного потенциала и двухкомпонентного электрического потенциала, предложенного акад. К.С. Демирчианом и проф. В.Л. Чечуриным, в направлении:

- численной реализации главных условий сопряжения на границе раздела сред с различными электропроводящими свойствами по осям с целью автоматизации расчета электромагнитного поля в сложных по геометрии областях, какими являются пространственные области нажимных устройств сердечника статора;

- разработки трехмерной модели для расчета магнитного поля в крайних пакетах сердечника статора турбо- и гидрогенераторов для учета явлений, имеющих место на стыке фазных зон.

4. Разработка метода расчета электромагнитного поля, который позволяет получить для трех составляющих векторного магнитного потенциала размерность систем уравнений, равную числу узлов сетки. При использовании этого метода все условия сопряжения становятся естественными, что при расчете вихревых токов в сложных по геометрии и неоднородных телах дает возможность непосредственно решать проблему выделения и выполнения главных условий сопряжения.

5. Теоретический анализ и обобщение результатов экспериментальных исследований эффективности экранирования нажимных фланцев и крайних пакетов сердечника статора турбогенераторов с помощью сложных составных медных шин с учетом возникающих термомеханических явлений, вызывающих неидеальные условия прилегания экрана к деталям нажимного фланца.

6. Разработка новых перспективных путей снижения потерь в крайних пакетах активной стали сердечника статора с использованием предложенного принципа "коллектирования" магнитных потоков рассеяния с помощью специальных магнитных вставок.

7. Исследование причин и разработка теории распушевки и повреждения пакетов активной стали сердечника статора на базе результатов модельных экспериментов и расчета электромагнитных сил, действующих на отдельные листы крайнего пакета, а также оценки возникающих термомеханических напряжений и деформаций внешнего контура, вызванных неравномерным распределением местных потерь и температур в склеенном пакете.

8. Обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований электромагнитных процессов в торцевых зонах турбо- и гидрогенераторов как традиционного исполнения, так и в конструкциях с полным водяным охлаждением для машин в широком диапазоне номинальных мощностей и при различных режимах работы в эксплуатации с целью выявления и обоснования принципов рационального проектирования торцевых зон статора турбо- и гидрогенераторов с учетом современных требований по их эксплуатации.

Практическая ценность диссертации состоит в разработке и обосновании эффективных конструктивных решений, обеспечивающих снижение потерь мощности в торцевых зонах статора турбо- и гидрогенераторов, а также исследовании сложных явлений в элементах конструкции, возникающих в процессе эксплуатации.

1. Предложены оригинальные конструкции сердечника статора с применением специальных магнитных вставок, размещаемых в торцевой зоне под крайними пакетами, для обеспечения и расширения нагрузочной способности крупных турбо- и гидрогенераторов. В отличие от известных решений магнитные вставки позволяют создать благоприятные условия для прохождения магнитных потоков рассеяния и повысить использование активной стали сердечника статора.

2. Внедрены следующие конструктивные решения, полученные на основе теоретических исследований:

- конструкция торцевой зоны гидрогенераторов мощностью 300 МВт, находящихся в эксплуатации на Нурекской ГЭС, включающая выполнение геометрии крайних пакетов сердечника статора, специальных прорезей в сегментах сердечника статора, вентиляционных каналов убывающей высоты к торцу машины, широких нажимных пальцев, специальных нажимных щек полюсов и немагнитных вентиляционных распорок, что позволило повысить нагрузочную способность гидрогенератора по данным испытаний на 70 МВт в режиме недовозбуждения при $\cos \varphi_{\text{емк}} = 0,95$;

- выполнение нажимных фланцев со специальными прорезями в нижней кромке, обращенной к обмотке статора, и установка силуминовых охладителей между фланцем и крайними пакетами в турбогенераторе типа ТЗВ-800, мощностью 800 МВт, 3000 об/мин, - что позволило снизить температуру нажимного фланца и крайних пакетов сердечника статора по данным испытаний на 80°C и расширить нагрузочную способность турбогенераторов данного типа в режимах недо возбуждения и неуправляемом асинхронном ходе;

- конструкция торцевой зоны гидрогенераторов мощностью 600 МВт для Рогунской ГЭС, включающая геометрию крайних пакетов сердечника статора, силуминовых охладителей, нажимных фланцев, полюсных щек и демпферных стержней переменного сечения по длине или с применением теплопроводной пасты, а также расположение охладителей и выполнение вровень торцов козырьков полюсных щек и крайних пакетов, - что позволило создать уникальный гидрогенератор вертикального исполнения мощностью 600 МВт, 166,7 об/мин с полным водяным охлаждением для подземной ГЭС;

- конструкция нажимного фланца с вогнутым под кольцо медным экраном для турбогенераторов типа ТТВ-200-2М, мощностью 200 МВт и типа АСТГ с продольно-поперечным возбуждением той же мощности, что позволило обеспечить работу турбогенераторов в режимах недо возбуждения вплоть до $\cos \varphi_{\text{емк}} = 0,9$.

3. Показано, что при применении в торцах сердечника статора турбогенераторов сплошных медных колец наряду с положительным эффектом экранирования крайних пакетов имеет место изменяющееся в процессе эксплуатации перетекание вихревых токов с фланцевых колец на короткозамкнутое кольцо экрана, что приводит к нестабильному тепловому состоянию нажимных устройств. Для повышения стабильности теплового состояния нажимного фланца в течение длительного срока эксплуатации турбогенераторов с полным водяным охлаждением предложено применять разомкнутые между собой сегменты, выполняющие роль охладителей и располагающиеся между кольцами нажимного фланца.

4. Установлено, что применение медных колец различной конструкции не может рассматриваться в качестве перспективного направления для уменьшения потерь в крайних пакетах сердечника статора турбогенераторов от полей рассеяния. Протекающие на кромках медных колец значительные вихревые токи могут существенно ограничить мощность машины при необходимости повышения ее линейных токовых нагрузок и работы в режимах недо возбуждения.

5. Выявлены закономерности изменения местных потерь в сегментах сердечника статора турбогенераторов в зависимости от числа зубцов в сегменте и их высоты, которые позволяют выбрать геометрию крайних пакетов сердечника статора при проектировании новых типов машин.

6. Показано, что выбор геометрии магнитных шунтов в торцевой зоне статора турбогенераторов необходимо производить с учетом минимизации магнитных потоков, вызывающих потери в крайних пакетах сердечника статора, нажимных фланцах и в обмотке статора.

7. Выявлены принципиальные физические процессы, которые надлежит учитывать при проектировании крупных электрических машин:

- более существенное нарастание потерь и нагрева в нажимных сегментах при переходе гидрогенератора из режима номинальной нагрузки в режим недовозбуждения при использовании немагнитных щек полюсов ротора по сравнению с магнитными;

- возможность распухания и повреждения склеенных пакетов за счет неравномерного нагрева и действия электромагнитных сил, возрастающих в режимах недовозбуждения;

- возникновение существенных внутренних термомеханических тангенциальных напряжений сжатия в спинке сердечника статора гидрогенератора с полным водяным охлаждением и необходимость увеличения за счет этого предварительного усилия растяжки сердечника;

- нарушение идеальной теплопередачи между силуминовыми охладителями, медными шинами, фланцем и крайними пакетами сердечника статора за счет возникновения термомеханических явлений в нажимных фланцах и деформации его внешнего контура;

- существенное увеличение потерь и нагревов в нажимных устройствах сердечника статора при переходе турбо- и гидрогенераторов из режима номинальной нагрузки в режим недовозбуждения, что требует специальных конструктивных решений для избежания закипания охлаждающей воды в генераторах с полным водяным охлаждением.

Реализация результатов работы. Результаты исследований, приведенные в диссертации, использованы при проектировании, изготовлении и совершенствовании следующих электрических машин;

- двухполюсных турбогенераторов с полным водяным охлаждением типов ТЗВ-800-2УЗ и ТЗВ-220 мощностью соответственно 800 и 220 МВт; с водородным охлаждением типа ТВР-1200 на ЛПЭО "Элект-

тросила", г. Ленинград;

- двухполюсных турбогенераторов серии ТТВ-200-2М и АСТГ-200, мощностью 200 МВт и ТТВ-500 мощностью 500 МВт на ПО "Электротяжмаш", г. Харьков;

- двухполюсных турбогенераторов типа ТВМ-500 в НИИ завода "Сибэлектротяжмаш", г. Новосибирск;

- гидрогенераторов для Саяно-Шушенской ГЭС, мощностью 640 МВт ($2p=42$) на ЛПЭО "Электросила";

- гидрогенераторов для Нурекской ($2p=30$) и Усть-Илимской ГЭС ($2p=48$) мощностью соответственно 300 и 240 МВт и гидрогенераторов с подым водяным охлаждением для Рогунской ГЭС мощностью 600 МВт, 166,7 об/мин на ПО "Уралэлектротяжмаш", г. Свердловск;

- синхронного компенсатора мощностью 320 МВА, 750 об/мин на ПО "Уралэлектротяжмаш" и турбокомпенсатора мощностью 320 МВА на завода "Электротяжмаш", г. Харьков;

- единой унифицированной серии двухполюсных турбогенераторов мощностью 63-800 МВт, 3000 об/мин на предприятиях Минэлектротехпрома;

- двухполюсного криогенного турбогенератора мощностью 1 МВт во ВНИИЭлектромаш,

Фактический экономический эффект от внедрения работ автора в народном хозяйстве в соответствии с представленными в работе актами внедрения составляет 2 млн, 900 тыс. руб. в год. доля автора - 1 млн. 140 тыс. руб.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались автором и получили одобрение на XIII-XIV научно-технических конференциях ВНИИЭлектромаш в 1970-1971 гг.; научно-технических конференциях "Турбо- и гидрогенераторы и синхронные компенсаторы", Ленинград, 1970 г. и "Проектирование, конструирование и изготовление турбогенераторов, синхронных компенсаторов и крупных электрических машин, отличающихся высоким уровнем использования активных и конструктивных материалов", Ленинград, 1973 г.; республиканской научно-технической конференции "Современные проблемы энергетики", г. Киев, 1973 г.; методическом совете по вычислительной технике по теме "Применение ВТ для моделирования электротехнических устройств", г. Москва, 1974 г.; Научном совете АН СССР по комплексной проблеме "Научные основы электрофизики и электроэнергетики" секции № I совместно с секцией турбо- и гидрогенераторов и крупных электрических машин

ТЭС Союзэлектромаш по теме "Исследования торцевых частей статора турбо- и гидрогенераторов большой мощности", г. Киев, 1977 г., секции № 2 по теме "Рассмотрение проблем сходимости итерационных методов решения стационарных задач теории поля", г. Киев, 1979 г., секции № 1 по теме "Численный эксперимент при создании мощных электрических машин", г. Ленинград, 1982 г., секции № 1, № 2 по теме "Метод магнитных зарядов и его применение для анализа трехмерных электромагнитных полей", г. Ленинград, 1986 г. и теме "Состояние вопроса разработки программных продуктов по расчету электромагнитных полей", г. Ленинград, 1987 г.; всесоюзных научно-технических конференциях "Проблемы нелинейной электротехники", г. Киев, 1981 г. и г. Черкассы, 1988 г.; всесоюзных научно-технических совещаниях "Вопросы проектирования, исследования и производства мощных турбо- и гидрогенераторов и крупных электрических машин", г. Ленинград, 1988 г., "Состояние и перспективы развития гидроэнергетики", Саяно-Шушенская ТЭС, 1988 г.; республиканском семинаре "Пути повышения эффективности и надежности электрических машин переменного тока", г. Киев, 1989 г.; III республиканской научно-технической конференции "Интегральные уравнения в прикладном моделировании", г. Одесса, 1989 г.; всесоюзной научной конференции "Математическое моделирование в энергетике", г. Киев, 1990 г., международном симпозиуме по электромагнитным полям, г. Варшава, 1985 г., международной конференции по электрическим машинам, г. Бостон, 1990 г., отдельные материалы использовались в докладах на встречах специалистов, сессиях МЭК, СИПЭ и СЭВ, представленных от имени СССР.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 70 работ, в том числе 3 монографии, 43 статьи в научно-технических журналах, 10 депонированных рукописей, 3 авторских свидетельства, 9 тезисов докладов и 2 доклада на международных конференциях.

Объем работы. Диссертация состоит из девяти глав, списка литературы и приложений. Она содержит 275 страниц машинописного текста, 141 рисунок, 34 таблицы, 97 страниц приложений. Список литературы включает 185 наименований работ советских и зарубежных авторов.

Содержание диссертационной работы

В первой вводной главе обоснована актуальность темы диссертации, выполнен анализ состояния проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, изложены основные методологические положения.

Необходимость решения проблемы обеспечения и расширения пределов нагрузочной способности и маневренности крупных турбо- и гидрогенераторов непосредственно следует из практических нужд эксплуатации. Приведены конкретные системные эксплуатационные требования к длительным и кратковременным режимам недовозбуждения турбогенераторов для регулирования напряжений высоковольтных линий электропередач. В связи с требованиями к турбогенераторам по маневренности энергоблоков показана необходимость продолжения изучения причин возникновения распухания и в последующем повреждения крайних пакетов сердечника статора, уточнения результатов расчета электромагнитных сил, действующих на лист стали сердечника статора, и термоупругих деформаций, вызванных неравномерным нагревом пакетов сердечника статора. Практикой освоения гидрогенераторов большой мощности подтверждается важность решения проблемы уменьшения потерь в крайних пакетах сердечника статора, оценки эффективности принимаемых мер для повышения нагрузочной способности гидрогенераторов в режимах недовозбуждения не только по характеру температурного поля, но и по соответствующим термомеханическим последствиям. Особенно это относится к тепловым и термомеханическим нагрузкам статора и тепловым перегрузкам роторных демпферных обмоток гидрогенераторов с полным водяным охлаждением. На базе обобщения экспериментальных данных по допустимым значениям $\cos \varphi$ при работе выпускаемых турбогенераторов с номинальной активной мощностью в режимах недовозбуждения констатируется, что определяющим фактором, препятствующим повышению нагрузочной способности турбогенераторов в режимах недовозбуждения, является чрезмерный нагрев крайних пакетов сердечника статора, который не позволяет использовать имеющиеся возможности генераторов по статической устойчивости при их работе в энергосистеме. Установлено, что не выяснены в достаточной мере комплексные возможности в связи с соответствующими электромагнитными, тепловыми и термомеханическими явлениями при использовании ряда ранее предложенных конструктивных мероприятий для снижения потерь и нагрева в торцевой зоне статора, в частно-

сти результаты установки в торцах сердечника статора медных систем, используемых в качестве электромагнитных экранов; эффективность многих мероприятий с учетом изменения состояния контактов в течение продолжительного времени эксплуатации генераторов; не достаточно выявлен характер повышения температуры нажимных фланцев в режимах недовозбуждения по сравнению с таковым в номинальном режиме. Вопросы выбора научно обоснованной конструкции торцевой зоны статора с учетом выполнения минимизации потерь не получили до сих пор должного развития.

Результаты фундаментальных работ К.С.Демирчяна, Я.Б.Данилевича, В.В.Домбровского, Г.Г.Счастливого, И.Т.Талышинского, А.И.Титко, В.Л.Чечурина и их учеников позволили разработать уточненные научные принципы по рациональному выбору конструкции торцевой зоны статора.

Во второй главе предложен ряд математических моделей, позволяющих решить задачи выбора геометрии, расположения и материалов конструктивных элементов торцевой зоны турбо- и гидрогенераторов на базе экономичных численно-аналитических методов расчета электромагнитных и тепловых полей. Развита численно-аналитические методы расчета электромагнитных полей, значительно расширяющие возможности аналитических методов с учетом геометрии торцевой зоны и расположения в ней неоднородных по магнитным и электрическим свойствам конструктивных элементов и способствующие более экономичному решению проблем компоновки торцевой зоны, чем численные методы.

При формировании моделей этой главы не учитываются вихревые токи в транспонированных элементарных проводниках обмотки статора и насыщение поверхностей всех ферромагнитных деталей, ограничивающих зону лобовых частей обмоток, что не вносит существенной погрешности в результаты расчетов.

Модель для оценки влияния магнитных и электропроводящих свойств материала нажимного фланца на электромагнитное поле в зоне крайнего пакета сердечника статора рассмотрена для наиболее значительной по величине части потока рассеяния, выпучивающегося из воздушного зазора в сторону лобовых частей. Анализ выполнен для случая немагнитной экранированной плиты и экранированного на боковых поверхностях магнитного шунта. Поверхности плиты (нажимного фланца) и экранов моделируются с помощью граничных условий для одной составляющей векторного магнитного потенциала. Для

возможности решения уравнений поля на стыке отдельных областей вводятся неизвестные функции Ψ и Ψ^* , гармоники которых затем определяются из бесконечной системы уравнений, полученной из равенства производных этих функций на границе областей. Для обеспечения практической точности решения из-за нулевых граничных условий в рассматриваемых случаях требуется учесть не более 20 гармоник функций Ψ и Ψ^* , причем коэффициенты в системе уравнений характеризуют геометрические размеры торцевой зоны и зависят от типа применяемой нажимной плиты.

Показано, что при использовании немагнитной нажимной плиты вихревые токи в плите вытесняют магнитный поток рассеяния в зубцовую зону крайнего пакета сердечника статора, что приводит к возрастанию индукции на его поверхности. Применение магнитной нажимной плиты, защищенной экранами с торцевых поверхностей, позволяет снизить магнитный поток, проникающий в зубцовую часть крайнего пакета сердечника статора, примерно на 30 %.

Модель для учета геометрии и неоднородности магнитных свойств конструктивных элементов рассмотрена применительно к решению задачи о расположении медного экрана относительно нажимной плиты для расчетных схем, показанных на рис. I. Определение электромагнитного поля в этом случае сводится к решению вариационной задачи на сопряжение для одной компоненты комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала. В качестве условий сопряжения служат условия непрерывности магнитного поля на границе смежных областей:

$$[\mathcal{A}] = 0 \quad \text{и} \quad \left[\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathcal{A}}{\partial n} \right] = 0, \quad (I)$$

где μ — магнитная проницаемость соответствующих сред. Приближенное решение находится методом Галеркина, которое корректируется с помощью приравнивания нулю вихревого тока в поперечном сечении рассматриваемой нажимной плиты с экраном. Базисные функции для сложной границы построены умножением выбранной линейно-независимой полной системы функций на уравнение границы области. С помощью функций алгебры логики (R-функций) стало возможным получить такие уравнения практически для границ любого вида, встречающихся в турбо- и гидротурбинах, и удовлетворить разрывным условиям сопряжения. Явные выражения таких функций $\omega_j(y, z)$ для случая границ, показанных на рис. I, получены в виде:

для рис. I, $a = \omega_0 = f_0 \wedge_0 f_1$, $\omega_1 = \omega_0 \wedge_0 (-\omega_2 \wedge_0 \omega_3)$, $\omega_4 = f \wedge_0 f_4$,

$$f_0 = \frac{y(b-y)}{b}, \quad f_1 = \frac{z(a-z)}{a}, \quad f = \frac{(b_2-y)(y-b_1)}{b_2-b_1},$$

$$f_4 = \frac{(a_4-z)(z-a_{4-1})}{a_4-a_{4-1}}, \quad \kappa = 2, 3; \quad (2)$$

для рис. I, $b = f_0 \vee f_1$ — те же, что в (2),

$$\omega_0 = f_0 \wedge_0 f_1, \quad \omega_1 = \omega_0 \wedge_0 (-\omega_2), \quad \omega_2 = \omega_1 \wedge_0 (-\omega_3),$$

$$\omega_3 = f_2 \wedge_0 f_2, \quad \omega_4 = f_4 \wedge_0 f_5, \quad (3)$$

$$f_2 = \frac{(b_2-y)(y-b_3)}{b_2-b_3}, \quad f_3 = \frac{(a_3-y)(y-a_2)}{a_3-a_2}, \quad f_4 = \frac{(b_2-y)(y-b_1)}{b_2-b_1}, \quad f_5 = \frac{(a_3-y)(y-a_1)}{a_3-a_1}.$$

Выражения R-функций получены также для других конструктивных модификаций, приведенных на рис. I. Для удовлетворения условий сопряжения, обусловленных наличием сред, имеющих различные магнитные проницаемости, применяется преобразование координат. Краевые условия, вызванные поверхностными токами, имитирующими на границе касательную составляющую магнитной индукции, продолжают-ся внутрь торцевой зоны с помощью R-функций. При совместном рассмотрении процессов в активной и торцевой зонах сердечника статора (рис. I, e) без использования поверхностных токов уравнения электромагнитного поля учитывают все три компонента векторного потенциала.

Предложенная методика реализована на ЭВМ. Расчеты показали, что для получения практически удовлетворительных результатов достаточно иметь не более 48 уравнений и значительно меньший объем вычислительной памяти, чем при использовании численных методов.

Модель для учета электромагнитных характеристик проводящих материалов в базисных функциях при решении электромагнитных задач в торцевой зоне генератора рассмотрена в терминах векторного потенциала:

$$\text{rot}(\gamma \text{rot} \vec{A}) = i\omega \gamma \vec{A} = \vec{J}_{\text{ст}}. \quad (4)$$

при нормировке $\text{div}(\gamma \vec{A}) = 0$ и условиях сопряжения:

для касательной составляющей вектора

$$[\vec{A}_2]_{\vec{e}_2, \vec{e}_3, \vec{e}_{23}} = 0, \quad [\gamma \text{rot} \vec{A} \times \vec{n}]_{\vec{e}_2, \vec{e}_3, \vec{e}_{23}} = 0; \quad (5)$$

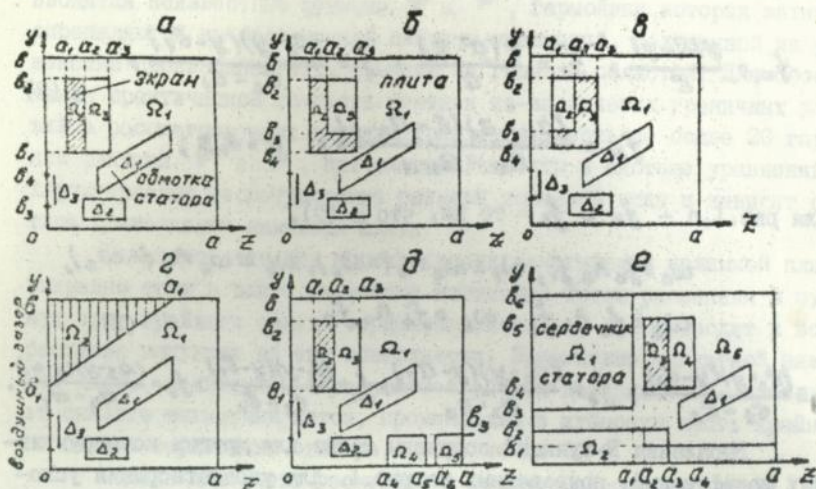


Рис.1. Расчетные схемы конструктивных модификаций
а, б, в – экран (заштрихован), плита; г – скошенный магнитный шунт; д – встроенный подшипник; е – совместное рассмотрение активной и торцевой зон без введения поверхностных токов

для нормальной составляющей вектора $\vec{A}$

$$A_n|_{r_2, r_3} = 0, \quad [\delta A_n]_{r_{23}} = 0. \quad (6)$$

Данный подход к решению задачи позволяет непосредственно выполнить требование равенства нулю нормальной составляющей плотности тока на границе проводящего тела и учесть воздействие магнитного поля от вихревых токов в торцевой зоне. Под решением задачи понимается функция

$$A_m = \sum_m a_{ij}^{(m)} \bar{\varphi}_{ij}, \quad (7)$$

для которой выполняется соотношение

$$\iint_{\Omega_k} [(\text{rot}(\nu_k \text{rot} \vec{A}^*), \bar{\varphi}^*) - \hat{\varepsilon} \omega \delta_k (\vec{A}^*, \bar{\varphi}^*)] ds + \int_{r_2 \cup r_3 \cup r_{23}} ([\nu \text{rot}_z \vec{A}], \bar{\varphi}_z^*) dr = \iint_{\partial \Omega} (\vec{J}_{\text{ст}}, \bar{\nu}^*) ds, \quad (8)$$

где i, j – индексы суммирования по осям, $\bar{\varphi}_{ij}$ – базисные функции, которые удовлетворяют условию $\Delta \nu \bar{\varphi}_{ij} = 0$ в каждой об-

ласти, условиям сопряжения и уравнениям электромагнитного поля в торцевой зоне и внутри проводящих сред. В частности, получено для области Ω_1 (рис.1,а)

$$\varphi_{xy}^I = -\frac{1}{2\lambda x_{ij}} \left(\frac{\pi c}{\delta} + \frac{\pi d}{a} \right) \cos \frac{\pi y}{\delta} \cos \frac{\pi j z}{a},$$

$$\varphi_{yz}^I = \frac{1}{x_{ij}} \sin \frac{\pi c y}{\delta} \cos \frac{\pi j z}{a}, \quad (9)$$

$$\varphi_{xz}^I = \frac{1}{x_{ij}} \cos \frac{\pi c y}{\delta} \sin \frac{\pi j z}{a};$$

для области Ω_2

$$\varphi_{xy}^{\text{II}} = \frac{1}{\lambda} \sum_{k=1}^{\infty} \left[\left(\frac{\pi \kappa}{\delta_2 - \delta_1} \right) (C_1 e^{\frac{\pi \lambda_k z}{\delta_2}} + C_2 e^{-\frac{\pi \lambda_k z}{\delta_2}}) \cos \frac{\pi \kappa (y - \delta_1)}{\delta_2 - \delta_1} + \right. \\ \left. + \frac{\beta_{\kappa}}{\delta_2} (D_1 e^{\frac{\pi \delta_{\kappa} y}{\delta_2}} + D_2 e^{-\frac{\pi \delta_{\kappa} y}{\delta_2}}) \cos \beta_{\kappa} (z - a_1) \sin \beta_{\kappa} (a_3 - a_2) \right], \quad (10)$$

$$\varphi_{yz}^{\text{II}} = \sum_{k=1}^{\infty} (C_1 e^{\frac{\pi \lambda_k z}{\delta_2}} + C_2 e^{-\frac{\pi \lambda_k z}{\delta_2}}) \sin \frac{\pi \kappa (y - \delta_1)}{\delta_2 - \delta_1},$$

$$\varphi_{xz}^{\text{II}} = \frac{1}{\delta_2} \sum_{k=1}^{\infty} (D_1 e^{\frac{\pi \delta_{\kappa} y}{\delta_2}} + D_2 e^{-\frac{\pi \delta_{\kappa} y}{\delta_2}}) \sin \beta_{\kappa} (z - a_1) \sin \beta_{\kappa} (a_3 - a_2).$$

Аналогичный вид имеет решение для области Ω_3 . Здесь $\lambda = \pi/\tau$; $x_{ij} = (\frac{\pi c}{\delta})^2 (\frac{\pi d}{a})^2 \lambda^2$, коэффициенты λ_k , β_k , δ_k и постоянные C_{ij} , C_{ij} , D_{ij} , D_{ij} , где $e = 2, 3$, определяются из условий непрерывности магнитного поля на границе смежных областей и условия для нормальной составляющей плотности тока на границе сопряжения сред с различной электропроводностью: $\delta_2 \varphi_z^2 = \delta_3 \varphi_z^3$ при $z = a_2$. Незвестные коэффициенты $\alpha_{ij}^{(m)}$ в выражении (7) определяются из системы алгебраических уравнений, полученных по методу Галеркина.

Электромагнитная модель для выбора геометрии крайних пакетов в зоне их ступенчатого скоса (рис.2,а) построена на основе замены решения полевой задачи определения магнитной индукции в торцевой зоне генератора расчетом электрической схемы замещения в виде эквивалентного многомерного генератора (ЭМГЭ) и внешней цепи (рис.2,г). ЭМГЭ рассматривается как схемная модель канонической (фундаментальной) области, которая показана на рис.2,б сплошными линиями, а профиль "внешней цепи" - пунктирными. Число ветвей ЭМГЭ определяется дискретизацией поверхности крайних

пакетов сердечника статора. ЭДС ветвей - из решения краевой задачи для фундаментальной области, собственные и взаимные сопротивления - с помощью конформного преобразования фундаментальной области и функции Грина (рис.2,в). Из электрической схемы находят токи ветвей, моделирующие магнитные потоки через участки дискретизации. Приводится в общем виде построение трехмерной модели и дается реализация ее двухмерного аналога для выбора геометрии крайних пакетов сердечника статора. Даны выражения для расчета магнитной индукции в произвольной точке области и произведен выбор геометрии крайних пакетов сердечника статора для турбогенератора путем минимизации магнитных потоков, при которой существенно уменьшены его значения под скосом вблизи зазора и практически не увеличены над скосом в области дна паза. Благодаря использованию в расчетах только граничных точек области размерность решаемой задачи невелика, а время, затрачиваемое на ее решение, не превышает нескольких секунд на ЭВМ типа СМ-4.

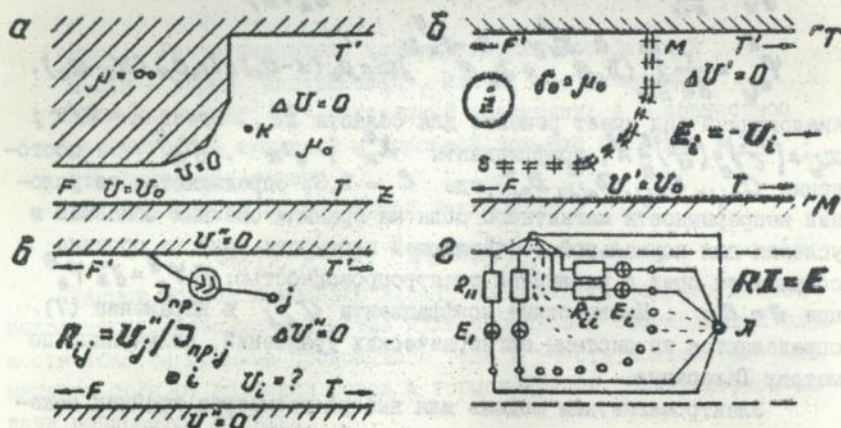


Рис.2. Замена торцевой зоны генератора схемй замещения в виде ЭМТЭ и внешней цепи.

Проведена оценка погрешности, возникающей в расчетах электромагнитного поля двух- и четырехполюсных турбогенераторов при использовании в аналитических моделях прямоугольной системы координат вместо цилиндрической, а также при допущении в некоторых моделях отсутствия периодического изменения составляющих поля по

тангенциальной координате. Показано, что пренебрежение кривизной области вносит сравнительно малую погрешность и не превышает 10% в зоне коронки зубца и 20% в зоне его основания. Результаты расчета аксиальной составляющей индукции подтверждены сопоставлением с опытными данными для турбогенератора мощностью 500 МВт, 3000 об/мин. Для различных режимов и для случаев различной геометрии крайних пакетов сердечника статора получены графические зависимости, позволяющие учесть в новых конструктивных вариантах влияние торцевого эффекта на аксиальную составляющую индукции от МДС зазора на торцевой поверхности сердечника статора, если ее расчет произведен при допущении о равномерном распределении радиальной составляющей индукции в зазоре на границе активной и торцевой зон генератора.

Тепловая модель позволяет аналитическим способом произвести оценку максимального нагрева крайних пакетов сердечника статора турбогенератора с полным водяным охлаждением, торцевые поверхности которых располагаются между силовыми охлаждаемыми. Расчеты, выполненные по данной модели и сопоставление с экспериментальными данными для турбогенератора типа ТЗВ-800 мощностью 800 МВт, 3000 об/мин показали, что в областях ступенчатых крайних пакетов сердечника статора, находящихся между охлаждаемыми, нагрев пакета значительно меньше, чем в областях неохваченных охлаждаемыми.

В третьей главе дано развитие математических моделей для численного расчета электромагнитного поля, вихревых токов и потерь в элементах торцевой зоны статора турбо- и гидрогенераторов.

Для взаимосвязанного изучения электромагнитных, тепловых и механических процессов в нажимных устройствах статора за основу принят метод скалярного потенциала, разработанный К.С. Демирчяном и В.Л. Чечуриным, который использован в едином программном комплексе для ЭВМ. Определение электромагнитного поля в этом случае сводится к решению системы относительно амплитуд скалярного магнитного потенциала $\vec{H}_M$ и двухкомпонентного векторного электрического потенциала $\vec{H}_0(H_{0r}, 0, H_{0z})$.

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \hat{\mu} \operatorname{grad} \vec{U}_M &= \operatorname{div} \hat{\mu} \vec{H}_0 - \vec{J}_M, \\ \operatorname{rot} \hat{\mu}^{-1} \operatorname{rot} \vec{H}_0 &= -j\omega\mu_0 (\vec{H}_0 - \operatorname{grad} \vec{U}_M), \end{aligned} \quad (II)$$

где $\hat{\mu}(\mu_r, \mu_\varphi, \mu_z)$ — магнитная проницаемость соответствующей области активной зоны статора или ротора; $\vec{J}(\vec{J}_r, \vec{J}_\varphi, \vec{J}_z)$ —

удельная электрическая проводимость.

Для решения системы (II) применяется метод Галеркина с конечноэлементным базисом. Используя технику метода конечных элементов, получаем систему алгебраических уравнений относительно искомым коэффициентов разложения по базису. При вычислении интегралов по конечному элементу используются естественные краевые условия и условия сопряжения. Для получения численного решения, соответствующего поставленной задаче, разработана автоматизированная методика учета главных условий. В частности, для учета главного краевого условия $\dot{H}_{0r} = 0$, следующего из равенства нулю нормальной составляющей плотности вихревого тока на поверхности проводящих тел, и главных условий сопряжения

$$[\dot{H}_{0r}] = 0 \quad \text{и} \quad \left[\frac{1}{r} \dot{H}_{0r} e_r + \frac{1}{r} \dot{H}_{0z} e_z \right] = 0, \quad (12)$$

(e_r, e_z — направляющие косинусы), следующих соответственно из непрерывности нормальной составляющей плотности тока и касательной составляющей напряженности электрического поля, предложено при решении систем алгебраических уравнений для определения коэффициентов разложения функции $\dot{H}_0$ перейти к новой переменной. В случае граничных узлов эта переменная удовлетворяет условиям для нормальной и касательной составляющих вектора $\dot{H}_0$, а в случае сопряженных узлов — удовлетворяет условиям (12). При переходе к новой переменной симметрия матрицы сохраняется. Данная методика позволила учесть конструктивные особенности нажимных устройств отечественных турбогенераторов с полным водяным охлаждением.

Трехмерная модель для численного расчета магнитного поля в крайних пакетах сердечника статора с учетом явлений на стыке фазных зон составлена из двух этапов и дает возможность оценить магнитный поток на торцевой поверхности зубцов статора при реальном ступенчатом распределении токов вдоль угловой координаты.

Первый этап состоит из вычисления скалярного потенциала в двумерной области (рис.3,а) с его периодическим изменением вдоль угловой координаты. Здесь непосредственно учитываются сложная геометрия крайних пакетов сердечника статора, наличие вихревых токов в нажимных устройствах, режим работы турбогенератора, а также магнитное состояние активной зоны машины. Система уравнений (II) для определения потенциалов $\dot{U}_n$ и $\dot{H}_0$ решается конечно

разностным методом и представляется в виде:

$$(D - \epsilon A^{-1} B) U = J_n, \quad (I3)$$

$$A h = -B U, \quad (I4)$$

где h - вектор длины $M = m_1 \times m_2$; m_1, m_2 - размеры проводящей области соответственно по r и z ; матрица A размером $M \times M$ соответствует дифференциальным операторам, действующим на $\vec{H}_0$; матрица D размером $2N \times 2N$ соответствует дифференциальным операторам, действующим на $\vec{U}_N$; $N = N_1 \times N_2$; N_1, N_2 - размеры торцевой зоны соответственно по r и z ; матрица B размером $M \times 2N$ соответствует оператору $\partial u / \partial z$; матрица ϵ размером $2N \times M$ - оператору $\partial u_2 / \partial z$.
В коэффициентах всех матриц учитываются краевые условия.

Для решения системы (I3-I4) применяется итерационный метод, эффективность которого подтверждается возможностью быстрого решения систем линейных уравнений с матрицами A и D . Итерационный параметр ϵ_{k+1} определяется из условия минимума нормы невязки $r^{(k)}$ системы (I3) и равняется

$$\epsilon_{k+1} = \frac{(r^{(k)} | v^{(k)})}{(v^{(k)} | v^{(k)})}, \quad (I5)$$

где $r^{(k)} = J_n - (D - \epsilon A^{-1} B) U^{(k)}$, $v^{(k)} = (D - \epsilon A^{-1} B) D r^{(k)}$, $k=0, 1, \dots$.
Алгоритм решения системы (I3-I4) реализован на ЭВМ типа ЕС в системе СВМ и сформулирован в виде:

решение систем $D \omega^{(k)} = r^{(k)}$; $A g = B \omega^{(k)}$;
вычисление $v^{(k)} = D \omega^{(k)} - \epsilon g$; ϵ_{k+1} ;
 $U^{(k+1)} = U^{(k)} + \epsilon_{k+1} \omega^{(k)}$; $r^{(k+1)} = r^{(k)} - \epsilon_{k+1} v^{(k)}$; (I6)

затем методом матричной прогонки решается система (I4). Применение метода приближенной факторизации для решения систем с матрицами D гарантирует пропорциональность числа итераций величине $1/\sqrt{h}$, где h - средний шаг неравномерностей сетки.

Результаты расчета первого этапа в виде:

$$U_n = Re [e^{j(\omega t - \frac{z}{v} - \varphi)} \vec{U}_E(r, z)], \quad (I7)$$

где $\vec{U}_E(r, z)$ - комплексный потенциал двумерной задачи, φ_0 - временной угол между МДС статора и ротора, используются в качестве граничных условий для задачи второго этапа:

$$\text{div} \mu \text{grad} U = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r J_r H_{\theta r}) \quad (I8)$$

в трехмерной области, имеющей форму криволинейного параллелепипеда (рис.3,б) и моделирующей объем машины в зоне зубов статора в месте перехода двухслойной обмотки статора из пазовой части в лобовую.

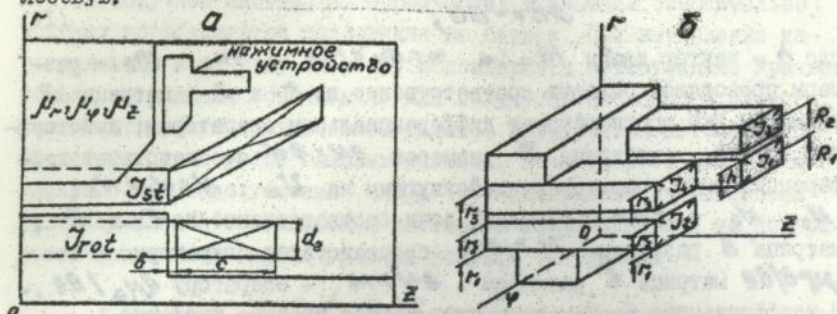


Рис.3. Этапы решения трехмерной задачи

Для анализа различных случаев стыка фазных зон обмотки статора угловое положение расчетной области на рис.3 может быть выбрано произвольно, при этом величина $H_{\text{ор}}(\varphi)$ должна быть вычислена по формуле:

$$H_{\text{ор}}(\varphi) = - \int_{\varphi_n}^{\varphi_n} J_z r d\varphi - \int_{\varphi_n}^{\varphi} J_z r d\varphi = - J_a r \sin \varphi_n - \int_{\varphi_n}^{\varphi} J_z r d\varphi, \quad (19)$$

где J_z — амплитуда первой гармоники плотности тока статора при решении задачи первого этапа.

Двухслойная обмотка статора эквивалентруется зарядами, расположенными на нижнем, среднем и верхнем радиусах обмотки статора, что обеспечивает погрешность в расчетах источников поля для турбогенератора не более 0,5%. Установлено сопоставлением значений аксиальной составляющей индукции на торцевой поверхности по разному скошенных пакетов сердечника статора, что использование размеров сетки 35x21x29 соответственно по осям r , φ , z обеспечивает выполнение практических требований к точности магнитного потока в трехмерной постановке.

Модель растекания вихревых токов в листовых сегментах сердечника статора позволила обосновать необходимое число зубов и их уровень укорочения в отдельном сегменте. Показаны недостатки применения 6-ти зубцовых сегментов и чрезмерного укорочения зубов до уровня дна паза.

Четвертая глава посвящена проблеме совершенствования модельных задач для расчета электромагнитных полей в торцевой зоне турбо- и гидрогенераторов на базе векторного магнитного и скалярного электрического потенциалов.

Рассмотрены погрешности, возникающие при формулировании граничных условий для векторного потенциала в торцевой зоне сердечника статора. Показано, что имитирование воздушного зазора с помощью размещения в нем проводника с тангенциальным током обеспечивает достаточную точность расчета индукции при отсутствии бегущего поля. При наличии бегущего поля необходимо размещать также радиальный ток вдоль радиуса, пренебрежение которым приводит к существенной погрешности в расчетах, увеличивающейся при сложной конфигурации крайних пакетов сердечника статора. Использование раздельных граничных условий, в которых составляющие векторного потенциала развязаны между собой, приводит к необходимости введения поверхностных токов при условии $\text{div } \vec{A} = 0$, либо к изменению вида решаемого уравнения при $\text{div } \vec{A} \neq 0$. При совместном учете пазов статора и воздушного зазора поверхностные токи для ограничения и упрощения области следует определять из решения трехмерной задачи. На базе экспериментальных данных для учета трехмерности задачи, возникающей из-за наличия зубчатости статора, получены корректирующие коэффициенты для расчета составляющих магнитной индукции и даны выражения для поверхностных токов.

Обоснована целесообразность построения расчетной модели для перспективных машин без использования поверхностных токов. В этом случае для расчета электромагнитного поля на базе потенциалов $\vec{A}$ и φ в электропроводящих элементах торцевой зоны следует решать систему:

$$\text{rot}(\nu \text{rot } \vec{A}) - i\omega \hat{\epsilon} \vec{A} + \hat{\sigma} \text{grad } \varphi = \vec{J}_{\text{ст}}, \quad (20)$$

$$\text{div}(\hat{\sigma} \text{grad } \varphi) = i\omega \text{div}(\hat{\epsilon} \vec{A}), \quad (21)$$

где $\nu = 1/\hat{\mu}$, $\hat{\mu}$ — тензор магнитной проницаемости, $\hat{\sigma}$ — тензор удельной электропроводности; $\vec{A}$, φ , $\vec{J}_{\text{ст}}$ — величины, с периодическим изменением во времени и по углу с соответствующими фазными сдвигами. В отличие от формулировки задачи (4)–(6), ориентированной на аналитический метод решения, здесь условия сопряжения на границах раздела сред μ_1, μ_2 с различными электромагнитными характеристиками представлены в виде:

$$[\vec{A}]_{r_{ij}} = 0, \quad [(\nabla \operatorname{rot} \vec{A})_z]_{r_{ij}} = 0, \quad (22)$$

$$[(\vec{r}(\omega \vec{A} - \operatorname{grad} \psi)_n)]_{r_{ij}} = 0 \quad (23)$$

и при вариационной постановке являются естественными, что не требует специального анализа для учета главных условий. Для устранения затруднений при применении потенциалов $\vec{A}$ и ψ , связанных с объемом вычислительной памяти, на основе метода Галеркина и специальных базисных функций, получена размерность системы уравнений, равная числу узлов сетки. В обобщенном решении базисные функции $\vec{v}$ выбраны так, чтобы обеспечить условие $\operatorname{div} \vec{v} = 0$. Для этого полагается, что $\vec{v} = \operatorname{rot} \vec{W}$, с непрерывной первой и существующей второй производными функции $\vec{W}$, которая представлена в виде:

$$\vec{W}(\rho, z) = \{ \xi_i(\rho) \xi_j(z); \xi_i(\rho) \xi_j(z); i \xi_i(\rho) \xi_j(z) \}. \quad (24)$$

Для удобства интегрирования кубический полином взят в виде:

$$\xi_i(\rho) = \begin{cases} \sum_{p=0}^3 \alpha_p^i \bar{\rho}^p, & \bar{\rho}_{i-1} \leq \bar{\rho} \leq \bar{\rho}_i; \\ \sum_{p=0}^3 \bar{\alpha}_p^i \bar{\rho}^p, & \bar{\rho}_i \leq \bar{\rho} \leq \bar{\rho}_{i+1}. \end{cases} \quad (25)$$

Такой же вид имеет полином $\xi_j(z)$ при замене в (25) ρ на z и ρ на q . Коэффициенты полинома вычисляются из условий: $\xi(0) = 0, \xi'(0) = 0, \xi(1) = 1, \xi'(1) = 1$.

С учетом выражений (24), (25) базисные функции равны:

$$\vec{v}_{ij}(\rho, z) = \sum_{\substack{p=0 \\ q=0}}^3 \sum_{\substack{p=0 \\ q=0}}^3 \alpha_p^i \bar{\alpha}_q^j A_{ipq} \bar{\rho}^{p-\alpha} \bar{z}^{q-1+\alpha}, \quad (26)$$

$$A_{ipq} = \frac{1}{L_z} \begin{bmatrix} -q \\ i q \\ 0 \end{bmatrix}, \quad A_{ipq} = \frac{1}{L_\rho} \begin{bmatrix} -\lambda \\ -\xi_p \\ 1 + \lambda + p \end{bmatrix},$$

где λ — коэффициент периодичности.

Решение для векторного потенциала находится по выражению (7). Система для определения скалярных неизвестных α_p^i имеет размерность, равную числу узлов сетки. Постановка задачи (20)–(23) обладает физической наглядностью, так как источниками поля служат плотности тока в обмотках статора и ротора.

В пятой главе приводится обоснование предложенных в работе моделей для расчета электромагнитного поля в торцевой зоне статора турбогенератора. Дан анализ влияния электрофизических параметров на электромагнитное поле в модельных задачах и непосредственное сопоставление результатов расчета с опытными данными для турбогенераторов мощностью 300, 500 МВт в различных режимах и результатами, полученными с помощью других менее универсальных методов, которые существуют для определения электромагнитного поля в том или ином конструктивном элементе торцевой зоны.

Полученные аналитические выражения позволили изучить структуру составляющих индукции в торцевой зоне турбогенератора. Показано, что влияние воздушного зазора на величину индукции в зоне нажимной плиты более существенно, чем в зоне щита. Для турбогенераторов с большими значениями линейных токовых нагрузок величина индукции на поверхности плиты в опыте короткого замыкания значительно больше, чем в опыте холостого хода. В зоне плиты и щита реакция вихревых токов достигает значительной величины.

Выражение для расчета аксиальной составляющей индукции в крайнем пакете сердечника статора получено с учетом реакции вихревых токов, сложной геометрии лобовых частей обмоток, окружающих ферромагнитных поверхностей, конечных размеров крайних пакетов сердечника статора и их магнитных свойств. Магнитные параметры крайних пакетов сердечника статора обусловлены сложным характером взаимодействия магнитных потоков в рассматриваемой области. В радиальном направлении происходит наложение торцевого потока на основной, в аксиальном — их пересечение. На магнитных параметрах в аксиальном направлении сказывается также слоистость пакета. Пользуясь магнитными характеристиками стали при наличии добавочного поперечного намагничивания (работы И.А.Зайцева, Бозорт Р. и др.) и теорией Л.Р.Неймана, показано, что эквивалентная магнитная проницаемость вдоль радиуса пакета с учетом наложения полей в нелинейной среде в целом значительно меньше, чем в массиве при отсутствии эффекта наложения полей. Результаты расчета аксиальной составляющей магнитной индукции на поверхности и глубине крайних пакетов, выполненные с учетом разработанной методики определения магнитных проницаемостей, подтверждены опытными данными для различных режимов работы турбогенератора мощностью 500 МВт, характеризующихся широким пределом изменения основного и торцевого потоков. Теоретическим и экспериментальным путем установлено, что

в режимах с основным магнитным потоком в зазоре, близким к номинальному, наблюдается существенно большая глубина проникновения торцевого потока в крайние пакеты сердечника статора по сравнению с таковой в режимах с ослабленным основным потоком, характерным для режимов недо возбуждения и опыта КЗ. Показано, что место максимального нагрева в крайних пакетах сердечника статора вдоль оси машины связано с характером затухания торцевого магнитного потока в сердечнике статора в зависимости от режима работы и конструктивных особенностей машины.

Доказана практическая равнозначность двух методических подходов к аналитическому расчету электромагнитного поля в крайних пакетах сердечника статора, связанных с использованием в качестве источника магнитного поля линейной токовой нагрузки или нормальной составляющей индукции на поверхности с последующим учетом реакции вихревых токов. Рассмотренная методика позволяет определять поля и потери в крайних пакетах сердечника статора с учетом сложной системы токов и различных конструктивных факторов.

Рассмотрено соотношение потерь в магнитных и немагнитных стальных элементах торцевой зоны и показано, что применение немагнитных нажимных плит взамен магнитных более эффективно для снижения соответствующих потерь в турбогенераторах, чем в гидрогенераторах из-за существенной разницы в размерах полюсного деления этих машин.

Экспериментальное исследование применимости разработанных математических моделей проводилось для турбогенераторов различной мощности, при этом погрешность при измерении модуля индукции составляет $\pm 5\%$, а при измерении ее фазы — ± 3 град. Экспериментальное исследование магнитных полей на поверхности крайних пакетов сердечника статора, обусловленных отдельно токами статора, токами ротора, и их совместным действием позволило установить: имеет место линейное изменение величины аксиальной составляющей индукции B_z на поверхности крайних пакетов в зависимости от тока статора; существует значительное влияние потока выпучивания на величину B_z . Показано, что в мощных турбогенераторах у основания зубца на торцевой поверхности крайнего пакета сердечника статора величина B_z становится больше в опыте короткого замыкания, чем в опыте холостого хода. Установлено, что возникновение в процессе эксплуатации неидеального электрического контакта между плитой и экраном в торцевой зоне статора искажает картину магнитного поля

и величину B_z на поверхности крайнего пакета сердечника статора вблизи дна паза, на поверхности плиты и экрана, но при этом сохраняется неизменным максимальное значение B_z на поверхности крайнего пакета сердечника статора вблизи коронки зубца. Наибольшее расхождение между опытными и расчетными значениями плотности вихревого тока в плите с экраном наблюдается в районе внутренней расточки нажимной плиты вблизи ее "носика", где возможны заметные термодформации плиты и экрана, в результате чего стекание вихревого тока с плиты на экран уменьшается. При наличии одной плиты без экрана расхождение между расчетными и опытными данными по плотности вихревых токов практически не наблюдается. Нарушение электрического контакта между экраном и плитой не создает ни разрыва контура для больших токов, ни точечных искрений и подгаров плиты, так как преобладающее значение имеет тангенциальная составляющая плотности тока в плите и экране.

В шестой главе представлены результаты исследования электромагнитных и температурных полей в нажимном фланце статора и его конструктивных элементах для турбогенераторов с полным водяным охлаждением и даны практические рекомендации для обеспечения работоспособности таких машин в процессе эксплуатации.

Показано, что среди элементов торцевой зоны статора узел нажимного фланца в наибольшей степени влияет на работоспособность и надежность турбогенераторов с полным водяным охлаждением. Индуктируемые в нажимных фланцах вихревые токи могут вызывать значительные местные потери, неравномерные нагревы и термодформации, которые существенно зависят от конструктивного исполнения машины, принимаемых мер по охлаждению и режима работы турбогенератора. Результаты расчетов и эксперимента показали, что при работе турбогенератора в режиме недовозбуждения с активной номинальной мощностью и $\cos \varphi = 0,95$ потери в нажимном фланце и его нагрев возрастают в 1,5 раза по сравнению с соответствующими потерями и нагревом в номинальном режиме. Для анализа рациональности конструктивных решений нажимного фланца применено численное моделирование электромагнитных, тепловых и механических процессов. Электромагнитное поле в торцевой зоне определяется из решения задачи (II)-(I2), а температурное поле — путем решения уравнения теплопроводности для неоднородного нажимного фланца (рис. 4) с учетом условий контактной теплопередачи. При идеальном тепловом контакте на границе соприкасающихся под областей выпол-

няются условия непрерывности температуры и плотности тепловых потоков, а при неидеальном тепловом контакте — известное условие пропорциональности плотности теплового потока разности температур между контактирующими поверхностями. Решение тепловой задачи позволяет оценить потери, отводимые водой через данную поверхность канала в полый шине. Правомерность примененного способа оценки потерь подтверждается сопоставлением результатов расчета с опытными данными, полученными при испытании турбогенератора типа ТЗВ-800 мощностью 800 МВт в наиболее характерных полых медных шинах. Расчеты и эксперименты показали, что потери, отводимые водой в медных шинах, достигают десятков кВт, причем в этом случае по составным конструктивным элементам шин протекают значительные вихревые токи, которые могут вызывать подгары неизолированных крепящих элементов.

Для оценки характера деформации нажимного фланца, вызванной неравномерным нагревом фланца и усилием прессовки, решается упругопластическая задача для перемещений на основе минимизации потенциальной энергии системы и деформационной теории пластичности. При определенных геометрических соотношениях и неравномерности нагрева термдеформации кромок фланца могут быть довольно значительными, что приводит к существенному возрастанию местных нагревов из-за нарушения идеального теплового контакта с поверхностью охладителей (рис.5).

Приведены результаты исследований: о необходимости охладителей, устанавливаемых между нажимным фланцем и крайним пакетом сердечника статора; об эффективности применения водяного охлаждения с помощью медных полых шин, охлаждаемых водой и встроенных внутрь нажимного фланца или специальным образом прикрепленных к фланцу и нажимному пальцу со стороны лобовых частей обмотки статора; о возможности обеспечения охлаждения с помощью шин, охлаждаемых водой. Установлено, что медная система шин и перемычек, прикрепляемая к нажимному фланцу со стороны лобовых частей обмотки статора, выполняет следующие функции (часть из которых во время эксплуатации может ослабевать):

экранирует независимо от срока эксплуатации нажимной фланец от магнитных полей зоны лобовых частей обмоток, что подтверждается сравнительно большими уровнями потерь в медных шинах на меньшем радиусе, достигающих десятков кВт. Эффективность экранирования может быть повышена за счет увеличения длины гибких шин эк-

рапа. Однако в этом случае токи на краях экрана могут достигать чрезмерных значений и возникает вопрос об охлаждении кромок самого экрана;

уменьшает концентрацию вихревых токов на краю нажимного фланца за счет стекания вихревых токов на медное кольцо, имеющее значительно большую электропроводность, чем материал фланца. Обнаружено, что с течением времени из-за окисления контактных поверхностей и ослабления крепления эффект "КЗ колец" медных шин понижается, и вихревые токи начинают замыкаться по краям нажимного фланца, что приводит к повышению его нагрева. Установка дополнительных охладителей может успешно предотвратить такое повышение температуры;

охлаждает поверхность фланца, так как температура меди меньше, чем температура прилегающих к нему фланца или нажимного пальца. Охладительная возможность данной системы невелика и зависит от величины тепловой проводимости контакта. Показано, что изменение нагревов с течением времени эксплуатации происходит в большей степени в местах, охлаждаемых короткими медными шинами, чем плоскими охладителями. Так, при нарушении теплового контакта между медными шинами и нажимным фланцем нагрев фланца по расчету может возрасти в 1,5-2,0 раза, что подтвердилось в эксплуатации при использовании зачеканки шин внутрь фланца. Нагрев нажимного пальца, прилегающего к плоскому охладителю, по той же причине изменяется в значительно меньшей степени.

На базе разработанной математической модели и анализа многочисленных экспериментальных данных предложены и обоснованы следующие конструктивные мероприятия:

1. Обязательная установка охладителей между крайним пакетом сердечника статора и нажимным устройством (кольцом или нажимным пальцем), что приводит к уменьшению потерь в кольце при электрически замкнутых охладителях почти в 1,4 раза и разделению тепловых потоков между нажимным устройством и крайним пакетом сердечника статора. Без установки охладителей температура крайних пакетов сердечника статора в большей степени, чем других пакетов зависит от развиваемой мощности турбогенератора и определяется подогревом от нажимных колец. В случае турбогенератора типа ТЗВ-800 разделение тепловых потоков фланца и крайнего пакета с помощью установки охладителей между ними позволило снизить нагрев пакета на 30°C .

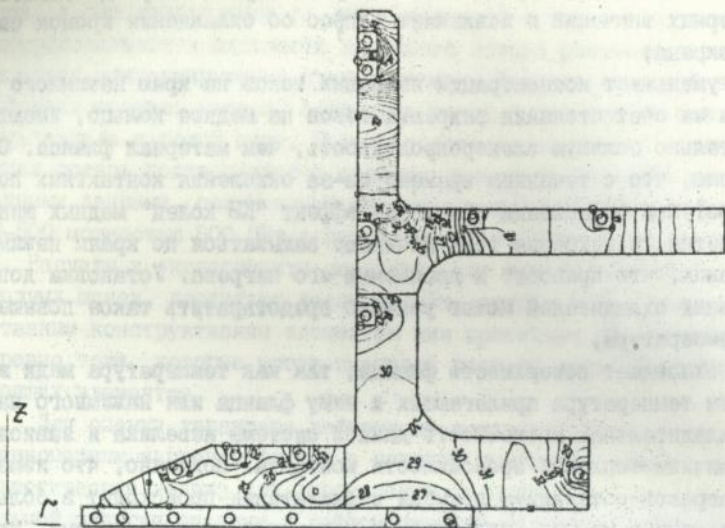


Рис.4. Тепловое поле нажимного фланца ($\Delta T^{\circ}\text{C}$)

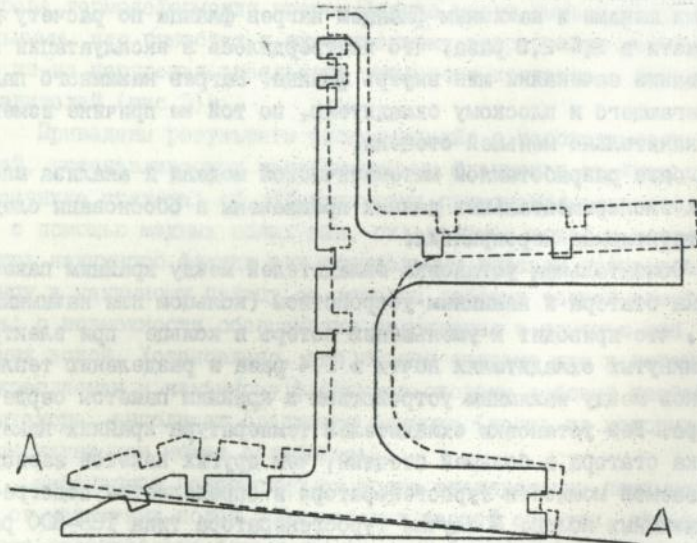


Рис.5. Эскиз деформированного нажимного фланца
(по линии АА нарушено плотное прилегание к охлажда-
телю)

2. Применение разрезов по нижней кромке кольца нажимного фланца, что приводит к существенному снижению перегрева кольца, например, в случае турбогенератора типа ТЭВ-800 перегрев кольца из-за разрезов уменьшился на 50°C .

3. Установка дополнительных охладителей между нажимными литым фланцем и пальцем. В случае применения дополнительных охладителей, электрически не замкнутых между собой, потери в литом фланце остаются практически неизменными. Поскольку потери в дополнительных охладителях весьма малы, то охладители служат в основном для охлаждения фланца, значительно уменьшая и стабилизируя во времени температуру "носика" нажимного фланца.

4. Установка в зоне "носика" нажимного пальца тонких медных разрезных прокладок между пальцем и охладителем, что позволяет выравнивать температуру пальцев в тангенциальном направлении и снизить максимальные нагревы "носика" пальца за счет высокой теплопроводности меди.

5. Уменьшение высоты скоса крайних пакетов сердечника статора. Так, уменьшение скоса с полной высоты зубца до его половины уменьшает потери во фланце почти в 1,5 раза, однако больший скос обеспечивает более благоприятное распределение потерь по торцевым пакетам сердечника статора, кроме пакетов около углов скоса.

В седьмой главе изложены результаты исследования эффективности различных принятых и предложенных конструктивных решений для повышения нагрузочной способности турбогенераторов в режимах недо возбуждения. Рассмотрены новые подходы к проектированию торцевой зоны пакета сердечника статора. Предложено производить выбор геометрии крайних пакетов сердечника статора на основе принципа минимизации потоков, вызывающих потери на вихревые токи в крайних пакетах сердечника статора, нажимных устройствах и на циркуляционные токи в обмотке статора. Разработана методика расчета указанных магнитных потоков. В результате, такие малоизученные явления как закупорки элементарных проводников стержня, развитие в них коррозионных процессов, повреждения элементарных проводников в процессе эксплуатации турбогенераторов мощностью свыше 500 МВт связаны с увеличением линейных токовых нагрузок в стержнях обмотки статора, действием в обмотке статора циркуляционных токов и геометрией крайних пакетов сердечника статора. Проведено сравнение эффективности выполненных скосов крайних пакетов сердечника статора на действующих турбогенераторах с эффективностью скоса, выбранного на основе принципа минимизации потоков. Оценено влияние различных

местных факторов, связанных с изменением геометрии торцевой зоны (ступенчатости, наличия вентиляционных каналов) на величину циркуляционных токов в элементарных проводниках. Наличие вентиляционного канала в зоне изменения ступенек в отличие от влияния ступенчатости пакетов сердечника статора приводит не к перераспределению ЭДС по проводникам, а к существенному увеличению ЭДС.

Рассмотрено магнитное поле в торцевой зоне при использовании магнитного шунта, который разработан в НИИ ЛПЭО "Электросила" для обеспечения требования стандарта о допустимости работы мощных турбогенераторов с номинальной активной мощностью в режиме недовозбуждения при емкостном $\cos \varphi = 0,95$. Показано, что применение магнитного шунта позволило перераспределить магнитные потоки, существенно снизив аксиальную составляющую индукции в зоне коронки зубца первого пакета сердечника статора и несколько повысив ее на поверхности шунта. Результаты расчета подтверждены экспериментальными данными, полученными для двухполюсных турбогенераторов мощностью 160 и 800 МВт с шунтом и 165 и 800 МВт без шунта. Установлено, что в самом благоприятном конструктивном варианте магнитный поток на торцевой поверхности сердечника статора за счет применения магнитного шунта уменьшается в 1,5 раза, ^{что} находится в пределах повышения этого потока при переходе турбогенератора из режима номинальной нагрузки в режим недовозбуждения с $\cos \varphi = 0,95$. Такие последствия шунтирования, как уменьшение использования активной стали, возрастание потока в области самого шунта до 1,5 раз по сравнению со случаем отсутствия шунта, концентрация магнитной индукции в углах сердечника статора из-за наличия геометрических углов больших 180° , снижают эффективность применения шунтов в качестве перспективного способа минимизации потерь. Для устранения этих недостатков предложен способ уменьшения потерь в крайних пакетах сердечника статора и торцевой зоне, который заключается в обеспечении благоприятных условий для прохождения магнитных потоков рассеяния. Такой способ может быть реализован в турбогенераторах без дополнительного расхода материалов с помощью различных конструктивных решений, представленных в работе. Применение таких решений позволяет уменьшить аксиальную составляющую индукции на торцевой поверхности в 4-16 раз в номинальном режиме работы и в 4-11 раз в режиме недовозбуждения, а также получить эффект увеличения активной длины сердечника статора примерно на 5% для турбогенератора мощностью 500 МВт, 3000 об/мин, что соответствует по-

лучению 21,5 МВт дополнительной мощности. Простота выбора геометрии магнитного коллектора (пакета) позволяет с большой точностью выполнить критерий оптимального соотношения магнитных индукций, вызванных токами в роторе и статоре для режимов недовозбуждения. Результаты, полученные для магнитного коллектора, позволяют рассматривать его использование как одно из наиболее перспективных направлений для обеспечения снижения потерь в режимах недовозбуждения.

Дана оценка перспективности применения экранов в турбогенераторах при возрастании линейной токовой нагрузки и для обеспечения их работы в режимах недовозбуждения. Расчетами и экспериментами, выполненными для турбогенератора типа ТГВ-500 мощностью 500 МВт, 3000 об/мин показано, что размещение медных пластин за нажимной плитой позволяет снизить вихревые токи в нажимной плите при наличии электрического контакта пластин с плитой почти в 1,5 раза и защитить спинку сердечника статора от потоков рассеяния. В то же время нагрев нажимной плиты с экраном при недовозбуждении по сравнению с нагревом в номинальном режиме возрастает в 1,4-1,6 раза. Резкая концентрация вихревого тока вдоль кромок экрана создает местные высокие нагревы и может привести к нежелательным термодформациям экрана и плиты. При увеличении линейных токовых нагрузок в перспективных турбогенераторах это может явиться непреодолимым препятствием для применения экранов с целью защиты нажимных плит от полей рассеяния.

Показано, что использование в эксплуатации режимов недовозбуждения турбогенераторов может существенно способствовать увеличению повреждаемости крайних пакетов сердечника статора. Повреждение крайних пакетов может при этом происходить за счет возникновения в них термодформаций от неравномерности нагрева. Последующий излом отдельных листов активной стали сердечника статора является результатом действия электромагнитных сил, создающих механические напряжения, превышающие предел усталости. Представлена методика расчета электромагнитных сил, действующих на лист крайнего пакета сердечника статора и произведено расчетное и экспериментальное обоснование влияния усилий, вызываемых наличием вихревых токов, которые возрастают в листах активной стали сердечника статора в режимах недовозбуждения. Пренебрежение влиянием вихревых токов может существенно (в отдельных случаях в двухкратном размере) снизить расчетное значение возникающей силы по сравнению с реально действующей.

В восьмой главе рассмотрены особенности электромагнитных и тепловых процессов в торцевой зоне крупных гидрогенераторов, проведено исследование причин неравномерного нагрева зубцов сердечника статора вдоль их торцевой поверхности и окружности машины, предложены и внедрены конструктивные предложения для повышения нагрузочной способности гидрогенераторов в режимах недовозбуждения.

Установлено, что при разработке конструктивных мероприятий для существенного снижения нагрева элементов торцевой зоны статора гидрогенераторов необходимо ориентироваться в первую очередь на возможность уменьшения индукции B_z , обусловленной полем выпучивания из воздушного зазора в зону лобовых частей. Особенности конструкции торцевой зоны гидрогенераторов позволили получить аналитическое выражение для расчета этой составляющей индукции и оценить основные факторы для ее снижения. Дано сравнение результатов расчета индукции B_z по предлагаемому выражению с опытными данными для различных режимов работы и типов гидрогенераторов. Достаточное для практических целей совпадение результатов расчета с опытными данными позволило сделать ряд заключений по распределению аксиальной составляющей индукции в гидрогенераторах различной мощности и при разных нагрузочных режимах. В отличие от турбогенераторов в гидрогенераторах наблюдается:

- резкое уменьшение составляющей B_z практически до нуля по длине первого пакета сердечника статора и вдоль его радиуса в пределах зубцовой зоны, что может привести к нежелательным термомодеформациям в зубцах;
- менее интенсивные магнитные поля, потери и нагрев в зоне нажимного фланца;
- довольно близкие значения и практически одинаковое распределение вдоль радиуса на поверхности крайних пакетов в опыте холостого хода и режиме номинальной нагрузки составляющей индукции B_z , являющейся наиболее существенным источником добавочных потерь;
- существенно меньшие значения индукции B_z на торцевой поверхности крайних пакетов сердечника статора в опыте короткого замыкания, чем при холостом ходе;
- существенно большее влияние потока выпучивания из зазора в сторону лобовых частей.

Приведены результаты расчета и сопоставление с опытными дан-

ными для составляющих магнитной индукции, вызывающих циркуляционные токи в обмотке статора, в режиме номинальной нагрузки и опыте короткого замыкания гидрогенератора Красноярской ГЭС мощностью 500 МВт ($2p=64$). Показано, что для проводника стержня обмотки статора, ближайшего к расточке, циркуляционные токи могут превосходить токи, соответствующие номинальному режиму нагрузки.

Для обеспечения допустимых нагрузок гидрогенераторов в режимах недовозбуждения, ограниченных нагревами крайних пакетов сердечника статора, исследованы факторы, влияющие на неравномерный характер распределения потерь и нагревов крайних пакетов. В качестве объекта исследований выбраны три однотипных гидрогенератора мощностью 500 МВт ($2p=64$) с однослойной обмоткой, что дало возможность изучить в более широком диапазоне торцевые потоки при различном сочетании стыков фазных зон стержней обмотки статора. Установлен механизм различного изменения температуры зубцов крайних пакетов сердечника статора в зависимости от значений $\cos \varphi$ и соответственно магнитного насыщения в этих зубцах. Выявлено, что при неизменной активной мощности переход гидрогенератора от режима с $\cos \varphi = 0,85$ к режиму с $\cos \varphi = 1$ сопровождается увеличением нагрева торцевых зон зубцов сердечника статора в одних местах по окружности машины и снижением в других. Установлено, что место нахождения по окружности машины зубцов со снижением нагревов связано с чередованием фаз прилегающих стержней и характерно для их прямого чередования — А и В, В и С, С и А. Чередование стыков фазных зон создает существенное перераспределение всех составляющих магнитной индукции вдоль окружности машины. Температура достигает максимальных значений на том зубце и том краю по ширине зубца, где аксиальная и тангенциальная составляющие индукции достигают максимальных значений и совпадают по временной фазе с ее радиальной составляющей. Показано, что рост температуры при переходе генератора из работы в номинальном режиме в режим недовозбуждения должен измеряться на сбегаящих краях зубцов, находящихся между стержнями, принадлежащих фазам, которые чередуются в противоположном направлении относительно вращения ротора.

На базе численного эксперимента проведен анализ различных конструктивных решений. В частности, предложены и внедрены меры по снижению потерь и нагревов в элементах торцевой зоны гидрогенератора Нурекской ГЭС, что позволило увеличить его активную нагрузку в режиме недовозбуждения с $\cos \varphi_{\text{снх}} = 0,95$ почти на 70 МВт.

Дана сравнительная оценка эффективности различных предложенных и применяемых конструктивных решений, в частности выполнения высоты шлицов, изменения длины вылета полюса относительно торца статора, применения немагнитных щек полюсов, немагнитных вентиляционных распорок и вентиляционных каналов различной ширины.

Показано, что выполнение высоты шлица в крайнем пакете сердечника статора больше высоты паза на 10–15% обеспечивает существенное снижение нагрева крайнего пакета сердечника статора в рабочих режимах гидрогенератора, причем снижение нагрева происходит в большей степени в зоне основания зубца и в меньшей – в зоне коронки. Так, по результатам расчетных и экспериментальных данных нагрев зубцов крайнего пакета сердечника статора при увеличении высоты шлица у Нурекского гидрогенератора со 150 до 180 мм уменьшился на 35°C;

– применение немагнитных нажимных щек полюсов ротора или их комбинаций (сверху немагнитная часть, внизу магнитная) вместо магнитных обеспечивает существенное перераспределение магнитных потоков в торцевой зоне, уменьшая величину потока на торце зубцов крайних пакетов сердечника статора и увеличивая ее в области нажимных сегментов. При этом в зоне нажимных сегментов происходит более резкое нарастание потока, потерь и нагрева в режимах недо возбуждения по сравнению с таковым при применении магнитных щек или мостиков насыщения, что может привести к их нагреву и, следовательно, ослаблению прессовки сердечника статора;

– применение немагнитных вентиляционных распорок приводит к уменьшению суммарных потерь в крайних пакетах сердечника статора на 20–40%, а увеличение зазора под крайними пакетами снижает существенно потери во втором пакете сердечника статора.

Установлено, что применение рассмотренных мер по снижению потерь обеспечивает допустимые уровни максимальных нагревов, однако при этом следует контролировать неравномерность местных нагревов по радиусу и длине пакетов сердечника статора. Рассмотрены термомеханические напряжения в пакете сердечника статора, вызываемые неравномерным нагревом по радиусу и длине пакета и показано, что наибольший вклад в распушевку пакета вносит неравномерность температуры по длине пакета.

В девятой главе проанализированы электромагнитные и температурные поля в сердечнике статора, нажимных фланцах, охладителях, сегментах крайнего пакета сердечника статора, а также в сердечни-

ке статора, щеке и демпферных стержнях полюса ротора гидрогенератора с полным водяным охлаждением. Сооружение подземных электростанций сделало исследование такого типа машин необходимым и проводится в работе на базе гидрогенератора мощностью 600 МВт (2р=36) для Рогунской ГЭС.

Изучена эффективность применения водяного охлаждения сердечника статора с помощью трубок, уложенных в аксиальные пазы, которые выштампованы на наружной поверхности спинки сердечника статора. В том числе влияние нарушения тепловых контактов между трубками и сердечником, которое может произойти в процессе эксплуатации, и неравномерности распределения потерь в спинке сердечника статора на его температурное поле. Установлено, что распределение температуры в радиальном направлении для сердечника статора, охлаждаемого водой, довольно неравномерно и должно быть учтено при определении его максимальной температуры и возникающих механических напряжений. Разность между температурами в наиболее нагретой точке и в точке на периферии сердечника статора составляет $49-32^{\circ}\text{C}$ при наличии эквивалентного воздушного зазора соответственно $0-0,1$ мм между трубками и сердечником статора по всей поверхности. Наиболее нагретая зона спинки сердечника статора расположена в случае нулевого зазора вблизи дна пазов, смещаясь к середине высоты спинки при возрастании зазора. Характер распределения температуры и максимальное ее значение примерно в равной степени зависит от интенсивности отвода тепла охлаждающими трубками, прижатыми с наружной поверхности сердечника, и от неравномерности распределения потерь в спинке сердечника статора, вызванной наличием в ней отверстий под стяжные шпильки. Так, наличие неидеального теплового контакта между трубками и сердечником статора в виде эквивалентного зазора величиной $0,1$ мм вызывает увеличение максимальной температуры сердечника на 18°C ; а неравномерное распределение потерь в спинке — на 20°C . Отключение воды при этих же условиях в одной трубке приводит к увеличению температуры на 18°C , а в двух трубках — на 69°C .

Расчетами и экспериментами на гидрогенераторах установлено, что потери в сердечнике статора при полном водяном охлаждении отводятся преимущественно водой в обмотке статора (57%), через трубки с водой, установленные по периферии спинки (39%) и охлаждающий воздух (4%).

Анализ механического состояния спинки сердечника статора с

помощью численного моделирования позволил установить, что неравномерный нагрев сердечника по отношению к окружающей среде вызывает его удлинение вдоль радиуса, отличающееся от удлинения при равномерном нагреве, и создает зоны внутри сердечника с механическими тангенциальными напряжениями сжатия, являющимися источниками возникновения геометрической "волны" сердечника. Для полной компенсации механических тангенциальных напряжений сжатия в сердечнике статора необходимо создать растягивающее усилие, обеспечивающее предварительный натяг между корпусом и сердечником, которое должно быть почти в 3 раза больше по сравнению с усилием, требующимся при равномерном нагреве. Осевое механическое напряжение, распирающее спинку сердечника при ее неравномерном нагреве, не достигает существенных значений из-за возможного удлинения стяжных шпилек.

Анализ температурных полей элементов торцевой зоны статора установил:

- необходимость охлаждения нажимных фланцев и выполнения в нем разрезов. Размещение силуминовых охладителей под фланцами является эффективным конструктивным решением для снижения температуры;

- целесообразность применения многозубчатых охладителей для сокращения числа водопроводящих трубок;

- необходимость применения группы охладителей, располагаемых между торцевым пакетом и сердечником. Данное решение позволяет исключить резкое повышение температуры сердечника статора в случае аварийного отсутствия воды в одной секции охлаждающих трубок на периферии, так как температура торцевых пакетов в большей степени зависит от появления зазора между трубками и сердечником, чем температура средних пакетов.

В результате исследований температурных полей в сердечнике и щеке полюса ротора для конструктивного выполнения гидрогенератора, когда торцы козырьков щеки находятся в одной плоскости с торцами сердечника статора, было показано, что:

- место, где достигается максимальная температура на поверхности полюсной щеки в номинальном режиме работы генератора, находится в зоне прижатия щеки к сердечнику и зависит от характера rifления щеки и теплопередачи от щеки к стержням полюса;

- изменение температуры по длине стержня достигает нескольких десятков градусов, поэтому существенную роль играют перетоки тепла от наиболее нагретой торцевой зоны в среднюю часть полюса

ротора. В процессе протекания несимметричных коротких замыканий наблюдается существенное изменение температуры по поперечному сечению стержня;

- применение теплопроводной пасты позволяет отвести тепловые потоки с поверхности щеки подроса в менее нагретые в номинальном режиме работы стержни и существенно снизить температуру щеки. Заполнение теплопроводной пастой воздушных промежутков между щекой и крайними стержнями или изменение по длине машины сечения этих стержней является эффективным способом снижения скорости нарастания температуры при несимметричных коротких замыканиях;

- охлаждение демпферных стержней водой по их внутренним каналам не является достаточно эффективным средством для снижения температуры нажимных щек полюсов без принятия специальных мер по сохранению стабильной теплопередачи от нагретой щеки к стержням.

Результаты исследований использованы ПО "Уралэлектротяжмаш" при создании уникального гидрогенератора для Рогунской ГЭС.

Заключение

В работе решена научная проблема, имеющая важное народнохозяйственное значение и заключающаяся в обеспечении требуемых и в целесообразном расширении пределов нагрузочной способности и маневренности крупных турбо- и гидрогенераторов в соответствии с существующими режимными требованиями за счет снижения общего уровня и неравномерности распределения электромагнитных потерь и нагревов в торцевой зоне статора и разработки ее рациональной конструкции. Выявлены общие закономерности электромагнитных и тепловых процессов в торцевой зоне статора турбо- и гидрогенераторов и получены новые результаты, имеющие теоретическое, расчетно-методическое и практическое значение.

I. Предложены математические модели для предварительного выбора рациональной конструкции торцевой зоны крупных турбо- и гидрогенераторов. Обоснованы научные принципы выбора геометрии крайних пакетов сердечника статора и развит новый метод "эквивалентного многомерного генератора ЭДС", что позволяет решать задачи выбора рациональной конфигурации торцевой зоны статора турбо- и гидрогенераторов с обеспечением минимизации потерь на вихревые токи в крайних пакетах сердечника статора, в нажимных устройствах сердечника и оценить потери на циркуляционные токи в обмотке статора. С помощью алгебры логики разработана методика описания гра-

ниц сложных областей торцевой зоны. При решении вопросов компоновки основных узлов торцевой зоны предложенная методика позволяет аналитическим способом учесть сложную геометрию зоны, несоизмерность длины воздушного зазора с габаритами конструктивных элементов и всей торцевой зоной в целом, наличие неоднородных элементов с вихревыми токами, взаимодействие магнитных полей активной и торцевой зон. Решена задача по оценке влияния экранирования нажимных плит на добавочные потери в крайних пакетах сердечника статора.

Применение разработанных математических моделей к решению практических задач, возникающих при создании новых типов турбо- и гидрогенераторов, обеспечивает точность получаемых результатов, необходимую для выбора рациональной конструкции на ранней стадии проектирования.

2. Разработана математическая модель для комплексного анализа электромагнитных процессов и вызываемых ими тепловых и термомеханических явлений как в торцевой, так и активной зонах статора турбо- и гидрогенераторов. Модель базируется на едином программном обеспечении метода конечных элементов для решения электромагнитных, тепловых и термомеханических задач, что способствует эффективному проведению численных экспериментов и учитывает основные факторы, связанные с использованием водяного охлаждения нажимных устройств турбо- и гидрогенераторов, влияние которых ранее не рассматривалось, в частности:

- сложную геометрию нажимного фланца в сочетании с наличием медных трубчатых проводников, кольцевых шин, плоских охладителей и медных перемычек;
- наличие неидеальных тепловых контактов между соприкасающимися поверхностями;
- возникающие термомеханические напряжения и их влияние на геометрию контактирующих поверхностей.

Сравнение результатов расчета и опытных данных показывает, что предложенная математическая модель позволяет получать необходимые данные для анализа электромагнитных и тепловых полей в торцевой зоне. Совпадение результатов расчета и опытных данных по температурам находится в пределах 10%.

3. В результате исследований на модельных машинах и турбо- и гидрогенераторах большой мощности выявлено:

- при работе турбогенератора в режимах недовозбуждения с ак-

тивной номинальной мощностью и коэффициентом мощности равным 0,95 потери в узле нажимного фланца сердечника статора и нагревы в нем существенно возрастают в 1,5–1,6 раза по сравнению с соответствующими данными в номинальном режиме. В результате состояние этого узла существенно влияет на работоспособность и надежность турбогенераторов, имеющих полное водяное охлаждение;

- в зубцовой зоне торцевых пакетов сердечника статора, особенно в гидрогенераторах, решающее влияние на величину аксиальной составляющей индукции оказывает магнитный поток "выпучивания" из воздушного зазора в зону лобовых частей. В зоне нажимных устройств магнитное поле токового слоя обмотки статора в турбогенераторах в отличие от гидрогенераторов становится соизмеримым с магнитным полем "выпучивания" из зазора;

- характер затухания по длине машины аксиальной составляющей индукции в крайних пакетах сердечника статора турбо- и гидрогенераторов зависит от режима работы генератора. Наибольшая глубина проникновения этой составляющей имеет место в режимах холостого хода и перевозбуждения, а наименьшая глубина с одновременным повышением местных потерь и нагревов в режимах недовозбуждения и оппте короткого замыкания. Неравномерное распределение аксиальное составляющей индукции и потерь в крайних пакетах сердечника статора связано с эффектом пересечения и наложения магнитных полей в сложной среде;

- эффективность применения медных экранов в нажимных устройствах турбогенераторов существенно зависит от электрического контакта между экраном и плитой;

- особенности геометрии крайних пакетов сердечника статора (ступеньки, вентиляционные каналы, нажимные кольца между пакетами) влияют на величину циркуляционных токов в обмотке статора;

- анализ повышения температур в торцевой зоне статора гидрогенераторов в режимах недовозбуждения по сравнению с таковым в номинальном режиме целесообразно проводить в районе обтекающих краев зубцов активной стали сердечника статора, находящихся между стержнями обмотки, принадлежащих фазам, которые чередуются в противоположном направлении относительно вращения ротора.

4. Разработан новый подход к оценке состояния торцевой зоны сердечника статора турбогенераторов по условиям обеспечения надлежащей нагрузочной способности турбогенераторов в режимах недовозбуждения. Установлено резкое затухание аксиальной составляющей магнитной индукции в торцевой зоне по длине сердечника в таких ре-

кимах, приводящее к возникновению неравномерного нагрева сердечника статора, что может способствовать распушению склеенных и запеченных крайних пакетов активной стали сердечника статора за счет термодформаций. На специальном макете подтверждено существенное влияние вихревых токов на электромагнитные силы, действующие на отдельный лист крайнего пакета сердечника статора, что может привести к поломке листов, особенно в турбогенераторах, преимущественно работающих в режимах недовозбуждения.

5. Установлены характерные особенности, которые необходимо учитывать при проектировании турбогенераторов с полным водяным охлаждением. К ним в первую очередь относятся:

- возможность возрастания почти в 1,5–2 раза нагревов нажимных устройств во время эксплуатации из-за нарушения идеальных тепловых контактов между соприкасающимися деталями;

- возможность снижения в процессе эксплуатации эффективности применения электромагнитных экранов в виде гибких и трубчатых медных шин, прижатых к элементам нажимного фланца и пальца со стороны лобовых частей;

- необходимость принятия мер для стабилизации нагревов элементов нажимных фланцев статора. На базе комплексной модели и экспериментов предложен и обоснован ряд конструктивных мер для снижения местных потерь и нагревов.

6. Предложены новые принципы выбора конструкции для минимизации аксиальных магнитных потоков в торцевой зоне, действующих на торец крайних пакетов сердечника статора в турбогенераторах. Установлены преимущества разработанных в соответствии с таким конструктивным направлением вариантов конструкции по сравнению с вариантом конструкции, в котором используется в основном магнитное шунтирование потоков рассеяния.

7. Исследованы электромагнитные и тепловые поля в сердечнике статора и полюсах ротора гидрогенератора с полным водяным охлаждением и дана оценка напряженно-деформированного состояния сердечника статора. Установлено, что:

- имеет место неравномерное распределение нагревов спинки сердечника статора, охлаждаемого водой с помощью трубок, размещенных по периферии сердечника. Неравномерный нагрев спинки сердечника вдоль радиуса приводит к изменению его радиального удлинения по сравнению с удлинением при равномерном нагреве, что должно учитываться при расчете приспособлений для растяжки сердечника;

- для обеспечения относительно невысокого уровня местных нагревов конструктивных элементов в торцевой зоне сердечника статора предложено использовать минимизацию потерь с помощью выбора размеров шлицов в зубцах активной стали, нажимных фланцах и охлаждающих, а также размещение силуминовых охлаждающих сверху и снизу крайнего пакета;

- потери в сердечнике статора отводятся преимущественно водой в обмотке статора (57%), через трубки с водой (39%) и охлаждающий воздух (4%). Закупорка канала в одной из трубок может привести к повышению температуры сердечника на 18°C , а в двух трубках на 69°C ;

- в номинальном режиме существенную роль в охлаждении поверхностных зон полюсных наконечников и щек полюсов, наряду с поверхностным охлаждением воздухом, играет отвод от них тепла в стержни и торцевые сегменты демпферной системы;

- при кратковременных нестационарных тепловых процессах, протекающих при несимметричных коротких замыканиях, скорость нарастания температуры стержней может быть существенно снижена за счет применения теплопроводной пасты. При этом уменьшается и разница в скорости нарастания температуры в крайнем и соседнем с ним стержнях.

8. Разработаны и внедрены мероприятия по снижению потерь и нагревов в торцевой зоне статора турбогенераторов типов ТВВ-1200, ТВВ-200-2М, АСТГ-200, ТВМ-500, ТЗВ-800 и гидрогенераторов для Усть-Илимской, Нурекской, Саяно-Шушенской и Рогунской ГЭС, что подтверждено соответствующими актами.

Основные публикации по теме диссертации Монографии

1. Брынский Е.В., Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Электромагнитные поля в электрических машинах. - Л.: Энергия, 1979. - 176 с.
2. Электромагнитные процессы в торцевых частях электрических машин/ А.И.Вольдек, Я.Б.Данилевич, В.И.Косачевский, В.И.Яковлев. - Л.: Энергоатомиздат, 1983. - 216 с.
3. Численные методы анализа электрических машин. Под ред. Я.Б.Данилевича. - Л.: Наука, 1988. - 224 с. / Яковлев В.И., гл.4.

Статьи, доклады, авторские свидетельства

4. А.с. № 1141512 СССР, Н 02 К 1/16. Статор электрической машины/ Яковлев В.И. - Опубл. 23.02.85. БИ № 7.
5. А.с. № 1119125 СССР, Н 02 К 1/16. Статор электрической машины/ Яковлев В.И. - Опубл. 15.10.84. БИ № 38.

6. А.с. 1599939 СССР, Н 02 К 1/16. Статор электрической машины/ Федоренко Г.М., Яковлев В.И., Янцов А.А. -Опубл.15.10.90. БИ № 38.

7. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И., Косачевский В.И. Электромагнитное поле на торце сердечника статора турбогенератора// Высокиспользование турбо- и гидрогенераторы с непосредственным охлаждением. Л.: Наука, 1971. С.21-28.

8. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Магнитное поле в зазоре в зоне крайних пакетов сердечника статора турбогенератора// Проблемы создания турбо- и гидрогенераторов большой мощности. Л.: Наука, 1971. С.3-10.

9. Яковлев В.И., Использование конформного отображения при численном методе расчета электромагнитных полей// Проблемы создания турбо- и гидрогенераторов большой мощности. Л.: Наука, 1971. С.27-37.

10. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Влияние расщепления зубцов крайних пакетов сердечника статора на распределение местных потерь// Проблемы создания турбо- и гидрогенераторов большой мощности. Л.: Наука, 1971. С.14-26.

11. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Магнитный поток и потери в зубцах крайнего пакета статора турбогенератора// Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1971. № 5. С.147-155.

12. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Электромагнитное поле в торцевой зоне турбогенератора при использовании немагнитного щита// Электротехника. 1973. № 9. С.49-54.

13. Анализ потерь и нагрева в крайних пакетах сердечника статора и пути их снижения в мощных генераторах / В.П.Анемподистов, Я.Б.Данилевич, В.И.Яковлев, Г.П.Езовит, И.М.Смолин// Тез.докл. Респ.научно-техн.конф. АН УССР "Современные проблемы энергетики". Киев, 1973. С.15.

14. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Влияние основного потока на распределение электромагнитного поля в крайнем пакете сердечника статора// Методы расчета и исследования турбо- и гидрогенераторов. Л.: Наука, 1974. С.16-26.

15. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Анализ электромагнитного поля в торцевой зоне турбогенератора// Доп. рук. 20 с. РЖ Сводный том. Электротехника и энергетика. № 4. 1975. реф.4И1622-75.

16. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Потери в нажимных пальцах турбогенераторов// Электричество. № 1. 1975. С.35-38.

17. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Эквивалентные магнитные свойства крайних пакетов сердечника статора// Методы расчета турбо- и гидрогенераторов. Л.: Наука, 1975. С.59-67.

18. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Электромагнитное поле в крайних пакетах сердечника статора турбогенератора// Методы расчета турбо- и гидрогенераторов. Л.: Наука, 1975. С.11-28.

19. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Влияние свойств материала нажимной плиты на электромагнитное поле в зоне крайнего пакета статора турбогенератора// Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1975. № 2. С.108-113.

20. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И., Косачевский В.И. Распределение аксиальной составляющей индукции и потерь по глубине крайних пакетов сердечника статора турбогенератора// Электротехника. 1975. № 12. С.14-18.

21. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Анализ потерь в скошенных крайних пакетах при наличии водяного охлаждения сердечника статора и перспективы их применения в крупных турбогенераторах// Со-временные проблемы энергетики: Тез. докл. П респ. научно-техн. конф. Украины, Киев, 1976. С.22-23.

22. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Численный метод расчета электромагнитного поля и потерь в зоне лобовых частей обмоток// Исследование турбо- и гидрогенераторов большой мощности. Л.: Наука, 1977. С.3-10.

23. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Влияние конструктивного исполнения торцевой зоны статора гидрогенератора на допустимые нагрузки в режиме недовозбуждения// Электротехническая промышленность, электрические машины, 1977. № 2. С.5-7.

24. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И., Державина А.Ю. Влияние электромагнитного экрана, устанавливаемого за немагнитной нажимной плитой, на электромагнитное поле и вихревые токи в торцевой зоне турбогенератора// Электротехника. 1977. № 7. С.17-20.

25. Яковлев В.И., Державина А.Ю., Пипко Р.М. Вопросы выбора торцевой зоны сердечника статора для серии турбогенераторов мощностью до 800 МВт, 3000 об/мин// Электрические машины. Исследования электромагнитных, тепловых и механических процессов. Л.: Изд-во ВНИИэлектромаш, 1977. С.3-13.

26. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Результаты исследований электромагнитных полей и потерь в зоне торцевых частей статора мощных турбо- и гидрогенераторов// Электрические машины. Исследования электромагнитных, тепловых и механических процессов. Л.: Изд-во ВНИИэлектромаш, 1978. С.3-19.

27. Вариационный метод расчета электромагнитного поля и потерь в торцевых частях турбогенератора// Т.А.Андреева, А.А.Березовский, Л.Д.Гординский, В.И.Яковлев// Институт математики АН УССР, Киев, 1978. 68 с.-(Препр.78.41).

28. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И., Державина А.Ю. Исследование эффективности экранирования торцевой зоны сердечника турбогенератора// Исследования турбо- и гидрогенераторов. Л.: Наука, 1979. С.3-9.

29. Применение алгебры логики для расчета конструктивных вариантов торцевых зон электрических машин/ А.А.Березовский, Л.Д.Гординский, Я.Б.Данилевич, В.И.Яковлев// Электрические машины. Исследования электромагнитных, тепловых и механических процессов. Л., Изд-во ВНИИэлектромаш, 1980. С.3-16.

30. Яковлев В.И., Босков Ю.А., Суханов Л.А. Циркуляционные токи и потери в лобовых частях однослойной обмотки статора гидрогенератора// Электрические машины. Исследования электромагнитных, тепловых и механических процессов. Л.: Изд-во ВНИИэлектромаш, 1980. С.71-81.

31. Применение проекционного метода при исследовании электромагнитного поля в торцевой зоне турбогенератора с ферромагнитными конструктивными элементами/ А.А.Березовский, Л.Д.Гординский, Я.Б.Данилевич, В.И.Яковлев// Проблемы нелинейной электротехники. Ч.П. Киев, 1981. С.159-162.

32. Яковлев В.И., Державина А.Ю., Сухревые токи в нажимном узле сердечника статора мощного турбогенератора// Вопросы надежности исследования электромагнитных, тепловых и механических про-

цессов в электрических машинах. Л.: Изд-во ВНИИэлектромаш, 1981. С.3-12.

33. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И., Пипко Р.М. Магнитное поле в торцевой зоне турбогенератора// Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1982. № 1. С.135-143.

34. Яковлев В.И. Взаимосвязь граничных условий и уравнений при расчете электромагнитного поля в торцевой зоне турбогенератора// Деп.рукописи: ВИНТИ, 1982. № 6. 30 с.

35. Березовский А.А., Гординский Л.Д., Яковлев В.И. Расчет электромагнитного поля в экранированной нажимной плите статора турбогенератора проекционным методом// Деп. научные работы: ВИНТИ, 1982. № 10. 17 с.

36. Косачевский В.И., Яковлев В.И. Электромагнитное поле в торцевой зоне с магнитным шунтом// Исследования крупных электрических машин. Л.: Изд-во ВНИИэлектромаш, 1982. С.154-169.

37. Яковлев В.И., Пипко Р.М. Критерий выбора геометрии крайних пакетов в мощных турбогенераторах// Исследования генераторов с полным водяным охлаждением. Л.: Изд-во ВНИИэлектромаш, 1983. С.64-73.

38. Яковлев В.И., Подольский В.В. Электромагнитные факторы неравномерного нагрева зубцов концевых пакетов генераторов// Деп. научные работы: ВИНТИ, 1984. № 3. 26 с.

39. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Граничные условия векторного потенциала магнитного поля// Электричество, 1984. № 10. С.52-54.

40. Влияние медного экрана на электромагнитные и тепловые процессы в торцевой зоне статора турбогенератора мощностью 500 МВт, 3000 об/мин/ В.И.Яковлев, Н.Л.Битицкий, А.Ю.Державина, В.Б.Каплунов, В.И.Лицов// Электротехника. 1984. № 4. С.55-57.

41. Снижение потерь в торцевой зоне гидрогенераторов/ Я.Б.Данилевич, В.И.Яковлев, А.В.Матвеев, Е.С.Зльберт// Электротехника. 1984. № 4. С.57-59.

42. Яковлев В.И., Гординский Л.Д. Проекционный метод расчета электромагнитного поля в торцевой зоне турбогенератора// Деп. научные работы: ВИНТИ, 1984. № 1. 31 с.

43. Яковлев В.И., Поклонов С.В., Лобачев В.В. Алгоритм расчета электромагнитного поля в торцевой зоне асинхронного двигателя электронасоса// Техника, технология, экономика: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 1984. Серия О. Вып.15.22 с.

44. Яковлев В.И., Сиденко Н.Р. Расчет нагрева крайних пакетов в турбогенераторах с полным водяным охлаждением// Деп. научные работы: ВИНТИ, 1984. № 1. 14 с.

45. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И., Пипко Р.М. Влияние поля пазового рассеяния на электромагнитные нагрузки зубцов крайнего пакета статора турбогенератора// ЭП. Электрические машины. 1984. № 1. С.1-2.

46. Яковлев В.И., Гординский Л.Д. Пути снижения потерь и совершенствования расчета электромагнитного поля в торцевой зоне статора// Исследования мощных турбо- и гидрогенераторов. Л.: Изд-во ВНИИэлектромаш, 1984. С.18-30.

47. Расчет потерь и нагрева в торцевой зоне статора турбогенератора с полным водяным охлаждением/ В.И.Яковлев, В.В.Лобачев,

С.И.Логинов, В.Г.Штрак// Деп. научные работы: ВИНТИ, 1985. № 7. С.159.

48. Верейская Л.А., Косачевский В.И., Яковлев В.И. Влияние магнитного пунта на магнитное поле в торцевой зоне мощных турбогенераторов// Электротехника. 1986. № 1. С.31-33.

49. Яковлев В.И., Варламов Ю.В., Черносвитов А.В. Алгоритм расчета трехмерного магнитного поля в зоне зубцов статора// Сложные электромагнитные поля и электрические цепи: Межауз.научн.сб. Уфа, 1986. № 14. С.48-52.

50. Яковлев В.И., Гординский Л.Д. Экономичная расчетная схема для численного моделирования электромагнитных полей на ЭВМ// Автоматизация исследований и расчетов генераторов. Л.: Изд-во ВНИИэлектромаш. 1986. С.23-32.

51. Температурное поле в торцевой зоне статора мощных турбогенераторов при водяном и водородном охлаждении// В.И.Яковлев, В.В.Лобачев, С.И.Логинов, В.Г.Штрак// Электротехника. 1987. № 4. С.49-53.

52. Яковлев В.И. Подольский В.В. Испытания листов электротехнической стали в электромагнитном поле// Деп. рукописи: ВИНТИ, 1987. № 3. С.160.

53. Верейская Л.А., Косачевский В.И., Яковлев В.И. Влияние линейных токовых нагрузок на потери и нагрев нажимной плиты статора турбогенератора// Исследования и разработки генераторов для перспективных электростанций. Л.: Изд-во ВНИИэлектромаш, 1987. С.68-76.

54. Автоматизированный комплекс программ для расчета электромагнитных, тепловых и механических задач в торцевой зоне крупных турбо- и гидрогенераторов/ В.И.Яковлев, С.П.Евтушенко, В.В.Лобачев, С.В.Поклонов, В.Г.Штрак// Автоматизация исследований электрических машин и управление ими. Л.: Изд-во ВНИИэлектромаш, 1987. С.135-145.

55. Яковлев В.И., Эльберт Е.С., Лобачев В.В. Особенности конструкции и расчета торцевой зоны гидрогенератора мощностью 600 МВт с полным водяным охлаждением// Состояние и перспективы развития гидроэнергетики, Саяно-Шушенская ГЭС, сент. 1988 г.: Тез.докл. Всесоюз.научн.-техн.совещания.Л.: 1988, С.82-83.

56. Расчетное обоснование конструкции торцевой зоны статора крупных турбогенераторов с учетом нелинейных эффектов/ Я.Б.Данилевич, В.И.Яковлев, В.В.Лобачев, В.Г.Штрак// Проблемы нелинейной электротехники. Ч.П. Черкассы, сент. 1988. Тез.докл. III Всесоюз. научн.-техн.конф. Киев, 1988. С.212-213.

57. Яковлев В.И., Карагуба А.С., Эльберт Е.С. Разработка конструктивных решений торцевой зоны мощного гидрогенератора с полным водяным охлаждением// Вопросы проектирования, исследования и пр-ва мощных турбо-, гидрогенераторов и крупных электрических машин, дек. 1988 г.: Тез.докл. Всесоюзного научн.-техн.совещания. Л.: 1988. С.70.

58. Исследование конструктивных решений торцевой зоны статора турбогенератора с полным водяным охлаждением/ Ю.Ф.Антонов, В.П.Чернявский, В.И.Иогансен, В.В.Коган, В.И.Яковлев, В.В.Лобачев, В.Г.Штрак// Вопросы проектирования, исследования и пр-ва мощных турбо-, гидрогенераторов и крупных электрических машин, дек.1988г. Тез.докл. Всесоюз.научн.-техн.совещания. Л., 1988. С.67.

59. Оценка конст. полным водяным охлажд. питаний/ М.Ф.Антонов, В.И.Яковлев, В.В.Лобачев, В.Т.Штрак// Исследования и вопросы проектирования турбо- и гидрогенераторов. Л.: Изд-во ВНИИЭлектромаш, 1989. С.12-24.
60. Медведев А.Л., Яковлев В.И. Анализ электромагнитного поля и потерь в нажимной плите турбогенератора численным методом// Сложные электромагнитные поля. Уфа, 1989. С.35-45.
61. Яковлев В.И., Варламов Ю.В., Черносвитов А.В. Электромагнитное поле в торцевой зоне статора в трехмерной постановке// Краевые задачи электродинамики. Киев: Ин-т математики АН УССР, 1989. С.24-45.
62. Суханов Л.А., Яковлев В.И. Повышение надежности сердечника статора гидрогенератора, охлаждаемого водой// Пути повышения эффективности и надежности электрических машин переменного тока. Киев, 12 сент. 1989 г.: Тез. докл. Респ. научного семинара. Киев, 1989. С.15-16.
63. Шакиров М.А., Яковлев В.И., Ладанюк Л.Я. К решению трехмерных задач при выборе геометрии торцевой зоны турбо- и гидрогенераторов// Исследования и вопросы проектирования турбо- и гидрогенераторов. Л.: Изд-во ВНИИЭлектромаш, 1989. С.35-45.
64. Метод граничных элементов для оптимизации поля в торцевой зоне турбогенератора с использованием специальных фундаментальных решений/ Я.Б.Данилевич, М.А.Шакиров, В.И.Яковлев, Л.Я.Ладанюк// Интегральные уравнения в прикладном моделировании. Одесса, ноябрь, 1989 г.: Тез. докл. III Респ. науч.-техн. конференции. Ч. I. Киев, 1989. С.62-64.
65. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Местные потери, нагревы и механические напряжения в нажимном узле сердечника статора турбогенератора// Электричество. 1991, № 2. С.35-42.
66. Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Потери и нагрев торцевой зоны статора гидрогенератора с водяным охлаждением// Электротехника, 1990. № 6. С.2-5.
67. Схемное моделирование конечных элементов и суперэлементов в композиционных алгоритмах анализа электромагнитных полей/ М.А.Шакиров, Р.П.Кияткий, Л.Я.Ладанюк, В.И.Яковлев// Математическое моделирование в энергетике. Киев, окт. 1990 г.: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конференции. Киев. Ч.IV. 1990. С.188-189.
68. Danilevitch Ya.B., Yakovlev V.I. Calculation of electromagnetic fields in the stator end windings of large electrical machines//International symposium on electromagnetic fields in electrical engineering (ISEF)85. Warsaw, Poland, 1985. September 26-28. P. 207-210.
69. Danilevitch Ya.B., Yakovlev V.I. Three dimensional magnetic field in the end region turbogenerator//Revue de physique appliquée (France). 1990. N 25, Juillet. P. 661-667.
70. Danilevitch Ya.B., Yakovlev V.I. Local losses, overheatings and thermomechanical stresses in the press flange of the turbogenerator stator core//International Conference on Electrical Machines, 13-15 Aug. 1990. Massachusetts Inst. of Technology. USA. Synchronous Machines. pt. II, Rep. 16.3.